

Sys.Wood: Holzbau im Lebenszyklus

Leitfaden



Autor:innen

FH JOANNEUM

Institut Architektur und Bauingenieurwesen
Dipl.-Ing. Katharina Schachner, BSc
FH-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Markus Wallner-Novak
Alte Poststraße 154
8020 Graz

Technische Universität Wien

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alireza Fadaei
Dipl.-Ing. Alexander Gerger, BSc
Fabian Ulrych, BSc
Dipl.-Ing. Marius Valente, BSc
Forschungsbereich Interdisziplinäre Tragwerksplanung
und Ingenieurholzbau
Karlsplatz 13/E259-02
1040 Wien

Schlüsselwörter

Holzbau, Holzbaudetails, Kreislaufwirtschaft, Lebenszyklusanalyse, Ökobilanz, Repair, Reuse, Systemoptimierung, Vorfertigung, Vorspannung, Wartung, Zerlegbare Verbindungen

Veröffentlichung

24.02.2026

© 2026 Verlag der FH JOANNEUM Gesellschaft mbH

Herausgeber FH-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Markus Wallner-Novak
Institut Architektur und Bauingenieurwesen
FH JOANNEUM

Umschlaggestaltung Larissa Ornig, Holzcluster Steiermark

Verlag der FH JOANNEUM Gesellschaft mbH

Alte Poststraße 149

A-8020 Graz

www.fh-joanneum.at

DOI: <https://doi.org/10.60588/rrw1-r893>

Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons CC BY-NC Lizenz.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten ausschließlich für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen (gekennzeichnet durch entsprechende Quellenangaben) kann weitere Nutzungsgenehmigungen durch die jeweiligen Rechteinhaber erfordern. Es wurden keine Inhalte automatisiert generiert. Sofern Anwendungen auf der Basis künstlicher Intelligenz eingesetzt wurden, erfolgte dies ausschließlich zur sprachlichen Korrektur und redaktionellen Unterstützung. Die fachliche und inhaltliche Verantwortung für die Beiträge sowie die Verantwortung für die Fotorechte liegen bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzfassung

Der vorliegende Leitfaden „Holzbau im Lebenszyklus“ bündelt die Ergebnisse des Projekts Sys.Wood und adressiert zentrale Maßnahmen für eine ressourcenschonende und kreislaforientierte Transformation des Holzbaus. Im Mittelpunkt stehen drei Themenfelder: Repair (Werterhalt durch Wartung), Reuse (Wiederverwendung und zerlegbare Konstruktionen) sowie Assessment (ökologische Bewertung im Rahmen der Lebenszyklusanalyse).

Im Themenfeld Repair wurden materialübergreifende, zielgruppenorientierte Wartungshandbücher entwickelt, die präventive Instandhaltungsstrategien systematisieren und zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Hochbauten beitragen. Reuse behandelt die konstruktiven und organisatorischen Voraussetzungen für eine zerstörungsarme Demontage und Mehrfachnutzung von Bauteilen. Auf Grundlage einer Analyse realisierter Best-Practice-Projekte werden Anforderungen an kreislauffähige Fügungen definiert, projektbezogen entwickelte sowie industriell gefertigte Verbindungssysteme verglichen und vertikale Vorspannsysteme als Ansatz zur Verbesserung von Demontierbarkeit, Systemrobustheit und Wiederverwendung vertieft untersucht.

Im Themenfeld Assessment erfolgt die Einordnung der entwickelten Ansätze in das normative System der Gebäudeökobilanz nach EN 15978. Die Untersuchung zeigt, dass die werkseitige Vorfertigung im Holzbau nur einen geringen Beitrag zum Treibhauspotenzial leistet und ihre wesentlichen Vorteile in systemischen Effekten hinsichtlich Prozessqualität, Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit liegen.

Der Leitfaden versteht sich als Beitrag zur Bauwende, indem konstruktive, organisatorische und ökobilanzielle Aspekte integrativ betrachtet und praxisnahe Instrumente für eine lebenszyklusorientierte Planung und Umsetzung im Holzbau bereitgestellt werden.

Abstract

The present guideline “Timber Construction in the Life Cycle” consolidates the results of the Sys.Wood research project and addresses key measures for a resource-efficient and circular transformation of timber construction. The focus lies on three thematic fields: Repair (value preservation through maintenance), Reuse (reuse and demountable constructions), and Assessment (environmental evaluation within the framework of life cycle assessment).

Within the Repair field, material-independent and target-group-oriented maintenance manuals were developed. These manuals systematize preventive maintenance strategies and contribute to extending the service life of buildings. The Reuse field examines the structural and organizational prerequisites for damage-free dismantling and multiple reuse cycles of components. Based on an analysis of realized best-practice projects, requirements for circular connection systems are defined, project-specific and industrially manufactured connection solutions are compared, and vertical post-tensioning systems are investigated as an approach to improve demountability, structural robustness, and reuse potential.

Within the Assessment field, the developed approaches are integrated into the normative framework of building life cycle assessment in accordance with EN 15978. The analysis demonstrates that factory prefabrication in timber construction contributes only marginally to the overall global warming potential and that its primary benefits lie in systemic effects related to process quality, resource efficiency, and circularity.

The guideline aims to contribute to the transformation of the construction sector by integrating structural, organizational, and environmental assessment aspects and by providing practical instruments for life cycle-oriented planning and implementation in timber construction.

Inhaltsverzeichnis

1 Holzbau im Lebenszyklus	1
1.1 Einleitung.....	1
1.1.1 Werterhalt durch Wartung – Repair.....	1
1.1.2 Holzbau in der Kreislaufwirtschaft – Reuse	2
1.1.3 Assessment – Ökologische Bewertung der Vorfertigung	3
2 Werterhalt durch Wartung – Repair	4
2.1 Ziele und Entwicklung	4
2.1.1 Zieldefinition.....	4
2.1.2 Recherchen	5
2.1.3 Entwicklung	7
2.2 Ergebnisse	9
2.3 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	10
3 Holzbau in der Kreislaufwirtschaft – Reuse	11
3.1 Kreislaufwirtschaft, Zerlegbarkeit und Wiederverwendung im Holzbau.....	11
3.2 Zieldefinition	11
3.3 Best-Practice-Beispiele.....	12
3.3.1 Recherche	12
3.3.2 Ergebnisse	13
3.4 Kreislauffähige Fügungen im Holzbau	14
3.4.1 Anforderungen	14
3.4.2 Projektbezogene zerlegbare Verbindungen	15
3.4.3 Kreislauffähige Systemverbinder	16
3.4.4 Systemvergleich.....	16
3.4.5 Ergebnisse	17
3.5 Vertikal vorgespannte Wände.....	17
3.5.1 Anwendung und Zielsetzung.....	17
3.5.2 Referenzlösungen und Anwendungen.....	19
3.5.3 Modellierung.....	20
3.5.4 Konstruktion	22
3.5.5 Versuche	22
3.5.6 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	23
4 Lebenszyklusanalyse	24
4.1 Bewertungssysteme.....	25
4.2 Der Einfluss der Vorfertigung auf die Ökobilanz.....	25
4.2.1 Stoffbilanz der Bauteile	25
4.2.2 Prozessanalyse der Vorfertigung.....	26
4.2.3 Quantitative Ergebnisse	26
4.2.4 Diskussion	26
4.3 Leitfäden zur Kreislauffähigkeitsbewertung	27
4.3.1 Leitfäden zur Kreislauffähigkeitsbewertung	28
4.3.2 Ergebnisse	28
4.4 Ökologische Bewertung von Wiederverwendeten Bauteilen	29
4.4.1 Herangehensweise	29
4.4.2 Vergleich der Außenwand Holz zu Beton	30
4.4.3 Bauteilwiederverwendung und Bilanzierung von Reuse-Bauteilen	31
4.5 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	32
5 Literaturverzeichnis	33

1 Holzbau im Lebenszyklus

1.1 Einleitung

Die Erreichung der international und national festgelegten Klimaziele ist eine zentrale Voraussetzung für die langfristige Sicherung menschlicher Lebensgrundlagen. Dem Bauwesen kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu, da es sowohl für einen erheblichen Anteil des globalen Ressourcenverbrauchs und des Abfallaufkommens als auch für wesentliche Treibhausgasemissionen verantwortlich ist. Diese entstehen nicht nur in der Nutzungsphase von Gebäuden, sondern auch in den vorgelagerten Phasen der Herstellung von Bauteilen, der Errichtung sowie dem Rückbau und der Entsorgung von Bauwerken.

Vor diesem Hintergrund besteht ein klarer Handlungsbedarf, Neubauprozesse ressourcenschonend zu gestalten, Emissionen über den gesamten Lebenszyklus zu minimieren und gleichzeitig die Nutzungsdauer sowie die funktionale Anpassungsfähigkeit von Gebäuden zu erhöhen. Insbesondere industrielle Vorfertigung, integrale Planungsansätze und robuste konstruktive Lösungen sind entscheidende Hebel zur Steigerung der ökologischen und ökonomischen Effizienz des Bauens, wie im Projekt Sys.Wood entlang der gesamten Wertschöpfungskette systematisch untersucht wurde.

Holz ist als konstruktiver Baustoff insbesondere aufgrund seiner Kombination aus Tragfähigkeit, geringem Eigengewicht und guten bauphysikalischen Eigenschaften für den industriellen Hochbau geeignet. Entscheidend ist jedoch nicht der Baustoff Holz allein, sondern dessen systematische Einbindung in die erforderliche Bauweise durch robuste, wartungsfähige und kreislauforientierte Bau- und Nutzungskonzepte. Dafür wurden die in Abbildung 1.1 dargestellten Grundsätze berücksichtigt.

Im Arbeitspaket „Holzbau im Lebenszyklus“ werden daher drei zentrale Themenfelder bearbeitet:

- **Repair** – die Entwicklung von Wartungshandbüchern für Hochbauten zur Verlängerung der Nutzungsdauer in Verbindung mit reparatur- und instandhaltungsfreundlicher Konstruktionsprinzipien,
- **Reuse** – die konstruktive und organisatorische Vorbereitung der Wiederverwendung von Bauteilen im Sinne der Kreislaufwirtschaft,
- **Assessment** – die differenzierte ökologische Bewertung von Bauteilen mit besonderem Fokus auf Vorfertigung und die Thematik der Wiederverwendung von Bauteilen.

Damit leistet das Projekt einen Beitrag zur Transformation linearer Bauprozesse hin zu systematisch kreislauforientierten Holzbausystemen.

1.1.1 Werterhalt durch Wartung – Repair

Neben der ökologischen Optimierung der Herstellungsphase rücken der Werterhalt und die Verlängerung der Nutzungsdauer bestehender Holzbauwerke zunehmend in den Fokus. Repair wird im Kontext von Sys.Wood nicht als reaktive Einzelmaßnahme verstanden, sondern als strategischer Bestandteil einer laufenden Instandhaltung sowie einer instandsetzungs- und lebenszyklusgerechten Planung. Dabei besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen konstruktiver Robustheit, Instandhaltungsfähigkeit und der langfristigen Nutzungsdauer von Holzhochbauten.

Die Erarbeitung strukturierter Wartungshandbücher für Holzhochbauten wird als wesentlicher Baustein zur Umsetzung dieses Ansatzes gesehen. Sie dienen der systematischen Vermittlung von Anforderungen an Inspektion, Wartung und Instandsetzung und tragen dazu bei, das Bewusstsein für vorsorgende Instandhaltung bei Bauherrschaften, Planenden und ausführenden Betrieben zu stärken. Der konkrete Bedarf an Wartungshandbüchern sowie die differenzierte Aufbereitung der Inhalte für unterschiedliche Perspektiven der Nutzer:innen und Mieter:innen, Eigentümer:innen, Betreiber:innen und ausführende Unternehmen wurden im Rahmen von Workshops mit den Wirtschaftspartnern des Projekts ermittelt.



Quelle: BMK 2022, Ressourcennutzung in Österreich 2024, Bericht, Seite 90
Bearbeitung und Anpassung im Rahmen des Sys.Wood-Projekts

Abbildung 1.1 Anwendung der 10 R-Strategien der Kreislaufwirtschaft im Holzbau. Darstellung aus der österreichischen Kreislaufstrategie [1]

1.1.2 Holzbau in der Kreislaufwirtschaft – Reuse

Die Wiederverwendung von Bauteilen stellt eine zentrale Strategie zur Schließung von Stoffkreisläufen im Bauwesen dar. Reuse ist jedoch grundsätzlich nicht isoliert zu betrachten, sondern in Relation zu Rohstoffverfügbarkeit, technischen Eigenschaften der Materialien sowie zu übergeordneten Klima- und Ressourcenzielen zu bewerten. Die Zielsetzung einer verstärkten CO₂-Speicherung im Bauwerksbestand durch einen höheren Holzbauanteil ist nicht zwangsläufig an eine Ausweitung des Holzeinschlags gebunden. Effizienzsteigerungen in der Materialausnutzung, eine Priorisierung der stofflichen gegenüber der energetischen Nutzung sowie konstruktive Optimierungen ermöglichen eine erhöhte Wertschöpfung pro eingesetzter

Rohstoffmenge. Die Kohlenstoffspeicherung in langlebigen Holzprodukten bleibt dabei unabhängig von temporären Schwankungen der Waldkohlenstoffbilanz klimarelevant. Voraussetzung ist eine nachhaltige, adaptive Waldbewirtschaftung, die ökologische Regenerationsfähigkeit, stoffliche Nutzung und Resilienz der Bestände miteinander verbindet.

Die Umsetzung kreislauforientierter Strategien ist mit technischen, organisatorischen und rechtlichen Herausforderungen verbunden. Im Projekt Sys.Wood wird Reuse als eigenständige Qualitätsebene verstanden, die bereits in der Entwurfs- und Detailplanung systematisch berücksichtigt werden muss. Relevante Entscheidungen betreffen dabei sowohl die Wahl der Trag- und Verbindungssysteme als auch die konstruktive Gliederung von Bauteilen und Bauteilgruppen.

Aus technischer Sicht erfordert Reuse insbesondere lösbare, zerstörungsarm trennbare Konstruktionen, die eine Demontage in einzeln Bauteile oder Materialien ermöglichen. Die im Projekt durchgeführten Untersuchungen und Workshops zeigen, dass konventionelle, möglicherweise selbsthemmende Verbindungsmittel die Wiederverwendbarkeit von Bauteilen deutlich einschränken. Demgegenüber weisen mechanisch lösbare oder vorgespannte Systeme ein signifikant höheres Reuse-Potenzial auf.

1.1.3 Assessment – Ökologische Bewertung der Vorfertigung

Im Arbeitsschwerpunkt *Assessment* wurden holzbauspezifische Fragestellungen der Lebenszyklusbewertung systematisch untersucht.

Einerseits wurden die Einflüsse der industriellen Vorfertigung in Partnerbetrieben auf die ökologische Gesamtbewertung quantifiziert und im Verhältnis zur materialbedingten Bilanz analysiert. Der Untersuchungsrahmen beschränkte sich bewusst auf Bauteile aus Unternehmen im Umfeld des Projekts Sys.Wood, um praxisnahe und belastbare Aussagen für den österreichischen Kontext zu ermöglichen. Betrachtet wurden typische Bauteilaufbauten des Holzbaus, insbesondere vorgefertigte Wandelemente mit unterschiedlichen Ausbaugraden.

Andererseits wurden im Projekt entwickelte Bauteilaufbauten in ausgewählten Lebenszyklusphasen – Herstellung, Errichtung, Nutzung und Entsorgung – bewertet. Ein Schwerpunkt lag auf der Frage der Systemgrenzen: Neben der gebäudebezogenen Bilanzierung wurden Szenarien zur Wiederverwendung von Bauteilen recherchiert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen über die Gebäudegrenze hinaus vergleichend analysiert. Damit wurde die Frage adressiert, inwieweit kreislauforientierte Strategien die bilanziellen Ergebnisse in erweiterten Betrachtungsräumen beeinflussen.

Die ökologischen Auswertungen fokussieren auf das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) der untersuchten Bauteile. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Differenzierung zwischen biogenem und fossilen CO₂-Äquivalenten. Während biogen gebundener Kohlenstoff im Material gespeichert und bilanziell gesondert ausgewiesen wird, stehen fossile Emissionen aus Energieeinsatz und Prozessketten im unmittelbaren Zusammenhang mit der anthropogenen Klimawirkung. Die transparente Trennung dieser Beiträge ist wesentlich für die sachgerechte Interpretation der Ergebnisse.

2 Werterhalt durch Wartung – Repair

Dieses Kapitel beschäftigt sich damit wie durch präventive Wartung und Instandhaltung die Lebensdauer von Bauwerken verlängert und Ressourcen geschont werden können. Die Zielsetzung und Rechercheansatz und die Entwicklung von Wartungshandbüchern werden näher beschrieben. Es entstehen materialunabhängige und zielgruppenorientierte Handbücher, die im Leitfaden verfügbar sind. Abschließend bietet der Ausblick einen Überblick über zukünftige Anwendungs- und Weiterentwicklungsmöglichkeiten sowie den weiteren Forschungsbedarf.

2.1 Ziele und Entwicklung

Wie einleitend beschrieben, wurde in diesem Themenfeld auf die zwei Grundsätze *Repair* und *Refurbish* fokussiert (Abbildung 1). Deren Umsetzung stellt ein wesentliches Instrument zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Bauteilen und Bauwerken sowie zur Sicherung ihres funktionalen und wirtschaftlichen Werts dar. Planung, Errichtung, Instandhaltung und Sanierung machen einen sehr großen Anteil der Lebensdauer aus [2].

Kreislaufgerechtes Bauen erfordert eine ressourceneffiziente und präventiv ausgerichtete Instandhaltungsstrategie, um den Werterhalt der Bausubstanz systematisch sichert und zugleich die ökologische Gesamtbilanz über den Lebenszyklus verbessert. In der Praxis wird die Instandhaltung jedoch häufig unterschätzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Errichter:innen, Betreiber:innen und Eigentümer:innen unterschiedliche, strukturell getrennte Rollen mit jeweils eigenen Interessen, Verantwortlichkeiten und Zeithorizonten einnehmen.

Während Errichter:innen primär auf die vertragskonforme Fertigstellung und Übergabe fokussieren, tragen Betreiber:innen die operative Verantwortung für Sicherheit, Nutzung und laufenden Betrieb. Eigentümer:innen wiederum bewerten Maßnahmen aus einer langfristigen wirtschaftlichen Perspektive. Mieter:innen beziehungsweise Nutzer:innen wiederum beeinflussen durch ihr tägliches Nutzungsverhalten maßgeblich den Zustand und die Beanspruchung des Gebäudes.

Diese strukturell getrennten Rollen führen häufig zu einer Fragmentierung der Lebenszyklusverantwortung. Werden Wartungs- und Inspektionsmaßnahmen nicht konsequent umgesetzt, resultieren daraus erhöhte Instandsetzungsaufwendungen, verkürzte Nutzungsdauern sowie eine Verschlechterung der ökologischen Performance des Gebäudes [2].

Ursprünglich lag der Schwerpunkt des Arbeitspakets auf der Entwicklung wartungsfreundlicher Konstruktionen im Holzbau. Im Verlauf der interdisziplinären Forschungsworkshops wurde jedoch deutlich, dass neben konstruktiven Maßnahmen insbesondere ein strukturiertes, zielgruppenorientiertes Informations- und Handlungsinstrument erforderlich ist. Der konkrete Bedarf an praxisnahen Wartungshandbüchern wurde somit erst im Dialog mit den Projektpartnern identifiziert.

Daher wurde untersucht, wie durch gezielte Wartungsstrategien die Bauwerkserhaltung und die Sicherung der Funktion langfristig erhalten werden kann. Die daraus entstandenen **praxisnahen und materialübergreifenden Wartungshandbücher** wurden zielgruppenspezifisch gestaltet.

2.1.1 Zieldefinition

Ziel der Wartungshandbücher ist die systematische Bauwerkserhaltung durch die Verlängerung der Nutzungsdauer mittels strukturierter Inspektions- und Instandhaltungsmaßnahmen. Im Mittelpunkt stehen der Werterhalt sowie die Sicherung der funktionalen Leistungsfähigkeit des Bauwerks über den gesamten Nutzungszeitraum.

Zur Erreichung dieses Ziels werden die Wartungshandbücher jeweils auf einer kombinierten Präventions- und Inspektionsstrategie aufgebaut.



Regelmäßige Präventions- und Inspektionsmaßnahmen sichern die Gebrauchstauglichkeit und den ordnungsgemäßen Betrieb des Gebäudes und vermeiden kostenintensive Schadensereignisse.

Ein weiteres übergeordnetes Ziel ist die Entwicklung eines materialübergreifend anwendbaren Wartungshandbuchs, das gleichermaßen für Holzbauwerke geeignet ist. Das Handbuch richtet sich an alle relevanten Akteur:innen – Mieter:innen bzw. Nutzer:innen, Eigentümer:innen, Gebäudeverwaltungen sowie ausführende Unternehmen – und bietet zielgruppenspezifisch aufbereitete, praxisnahe und verständliche Leitlinien zur Umsetzung einer strukturierten Instandhaltungsstrategie.

2.1.2 Recherchen

Zur Erreichung der Ziele wurde als Grundlage eine umfassende Recherche durchgeführt. Dabei kamen sowohl Literatursauswertungen etablierter Quellen als auch Interviews mit Expert:innen zum Einsatz.

Ziel der Erhebung war es, allgemeine Rahmenbedingungen aus dem Hochbau und Inspektionsintervalle zu erfassen und Instandhaltungsmaßnahmen zu identifizieren. Ergänzend dazu wurden Maßnahmen zum Werterhalt erhoben, sowie Einflüsse aus der Nutzungsphase untersucht, die den Erhalt und die Lebensdauer von Hochbauten wesentlich beeinflussen.

Die Recherchen stützen sich außerdem auf technische Dokumentationen, Herstellervorgaben, Betriebsanleitungen, einschlägige Normen sowie auf Erfahrungswerte aus der Praxis. Abbildung 2.1 zeigt die Themenfelder der Recherchen mit der Schnittmenge als Grundlage für die Erstellung der Wartungshandbücher.

Zu den herangezogenen Quellen zählen unter anderem:

- Mein Haus wird älter - was tun? Ratgeber mit Checklisten zur Vermeidung von Bauschäden durch preiswerte Pflege und Unterhaltung [3]
- Pflege und Wartungsanleitung [4]
- Wartungsanleitung für Beschichtungen auf Holzoberflächen im Außenbereich [5]
- Nutzungsanleitung Holzbau Information an die Nutzer [6]
- Terrassen aus Holz [7]
- Fassade: Planen, Montieren, Pflegen [8]
- Nutzungsdauern von Bauteilen [9]
- ÖNORM B 1300 [10]
- ÖNORM B 3417 [11]
- ÖNORM B 3419 [12]
- ÖNORM B 3521-1 [13]
- ÖNORM B 3691 [14]
- ÖNORM B 3692 [15]
- ÖNORM B 3802-1 [16]
- ÖNORM B 4119 [17]

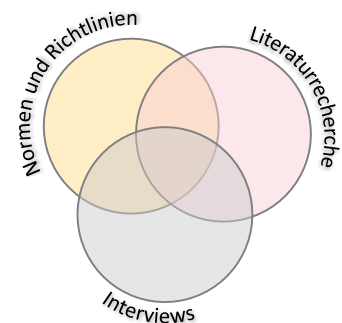


Abbildung 2.1 Rechercheumfang

Die Analyse und Auswertung der Quellen ermöglichte eine systematische Kategorisierung der wesentlichen Bauelemente sowie die Zuordnung von Wartungs- und Inspektionsintervallen und spezifischen Instandhaltungsmaßnahmen. Einflüsse aus der Nutzungsphase wurden identifiziert. Dabei wurde das unterschiedliche Verantwortungsniveau der Zielgruppen – Mieter:innen, Eigentümer:innen, Verwaltungen und ausführende Unternehmen – berücksichtigt.

Interviews

Ergänzend zur Literaturrecherche wurden Interviews mit Betreibern durchgeführt, um den praktischen Umgang mit Wartung und Instandhaltung im Hochbau nachzuvollziehen. Die Interviews dienen unter anderem auch dazu, der Kritik entgegenzuwirken, dass der Holzbau besonders Wartungsintensiv ist. Die Gespräche sollten darüber aufklären, dass Wartung ein zentrales Thema im gesamten Hochbau darstellt und dass sich der Holzbau in der Wartung nicht grundlegend von den anderen Bauweisen unterscheidet.

Hierfür wurden zwei Interviews geführt. Die Interviewpartner verwalten zu zweit rund 105.000 Miet- und Eigentumswohnungen in Österreich und verfügen über eine umfassende Erfahrung im sozialen Wohnbau. Die Erkenntnisse aus den Interviews zu den Themen Wartung und Instandhaltung werden in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1 Zusammenfassung der Interviews zum Thema Wartung und Instandhaltung im Betrieb

	Gemeinsamkeiten	Interviewpartner 1	Interviewpartner 2
Allgemeines	Wartungshandbuch Keine Wartungshandbücher wurden verwendet. Bei Wohnungsübergabe wird eine Mappe mit Nutzerhinweisen und -empfehlungen übergeben (z.B. richtiges Heizen und Lüften).	Die Übergabemappe beinhaltet Nutzerhinweise zur richtigen Reinigung.	
	Verwaltungsaufteilung Die Verwaltung bleibt sowohl bei Miete als auch bei Eigentum bestehen.	Alle Rechtsformen sind vertreten (Miete, Eigentum, Freifinanzierung, Förderung).	Die Verwaltung betreut überwiegend Mietwohnungen.
	Herausforderungen Das Nutzerverhalten ist ein großes Thema. Verhaltensregeln werden an Nutzer:innen vermittelt. Auf die Verhaltensregeln wird vor Kauf bzw. in der Bewerbungsphase eingegangen.	Wohn-Ein-Begleitung mit Vor- und Nachbesprechungen werden durchgeführt. Herausforderungen werden in der richtigen Reinigung gesehen.	Das Nutzerverhalten wird mit einem 5-minütigen Video vermittelt.
Organisatorisches	Unternehmensstruktur Eine Kommunikationsplattform für Instandsetzung wird angewendet. Der Fortschritt der Instandsetzung wird über das jeweilige System kommuniziert.	Die Kommunikationsplattform ist eine App. Organisiert ist die Aufteilung gebietsweise.	Die Kommunikationsplattform ist ein digitales schwarzes Brett. Informationen werden zentral auf einer hausinternen Plattform hinterlegt. Die Organisation unterliegt den Hausverwaltern selbst.
	Dokumentation Instandhaltungsarbeiten werden nicht statistisch ausgewertet.	Die Unterlagen werden von Auftragsverwaltern archiviert.	Die Unterlagen werden auf der hausinternen Plattform archiviert.
	Intervalle Intervalle werden laut Norm durchgeführt. Eine statistische Auswertung der tatsächlich anfallenden Wartungsintervalle wird nicht umgesetzt. Eine präventive Wartung wird nicht durchgeführt.	Intervalle für die Gebäudehülle sind wichtig. Bei den Intervallen orientiert man sich an den Nutzungsdauerkatalog.	Ein hausinternes Prognose-Tool wird für bevorstehende Sanierungen verwendet. Die Intervalle laut Bauwerksbuch werden eingehalten. Umsetzung von regelmäßigen Intervallen aus finanziellen Gründen nicht möglich.
	Wartungsdurchführung		
		Innerhalb der Gewährleistungsfrist führen ausführende Unternehmen die Wartung durch.	Eine kleine Abteilung führt die Wartung durch. Die Durchführung der Überprüfungen laut ÖNORM führt eine kleine Tochter durch.
Technisches	Wartungsintensive Elemente Wartungsintensiv ist die Gebäudehülle.	In der Gebäudehülle ist das Flachdach wartungsintensiver.	
	Sensorik und Messtechnik		
		Verschiedenste Messtechnik wird angewendet.	Mechanische Lösungen werden bevorzugt. Der Einsatz von Sensorik bei Decken in Nassräumen ist Thema.
Wirtschaftliches	Finanzierung Die gesetzlich vorgegebene Rücklage ist ausreichend. Eigentümergemeinschaften entscheiden selbst, ob sie über Rücklagen oder Darlehen finanzieren möchten.		Mit einem hausinternen Prognose-Tool können die Rücklagen frühzeitig angepasst werden.
	Kostenverantwortung Die Kosten werden von den Wohngemeinschaften selbst über Rücklagen bzw. Darlehen getragen.		
Rechtliches und Normatives	Gesetzliche Vorgaben und Normen Die Wartung wird laut Norm durchgeführt.		
	Vertragliche Festlegungen Nach Übergabe werden keine zusätzlichen Wartungsverträge abgeschlossen. Man orientiert sich an den rechtlichen Vorgaben.		
Sonstiges	Herausforderungen im Sozialwohnbau Die Wartung unterscheidet sich nicht im Vergleich zu anderen Immobilien.	Der richtige Umgang der Immobilie ist nicht so ausgeprägt wie bei anderen Immobilien.	
	Besonderheiten in der Wartung von Holzbauten	Ein Hauptaugenmerk liegt auf dem Nutzer:innen verhalten. Laufende Begehungen und Kontrollen werden durchgeführt.	In den hausinternen Softwares muss noch der Holzbau stärker hervorgehoben werden, damit diese Information bei Wartung und Instandhaltung berücksichtigt wird.

Feedback und Workshops

In einem zweistufigen Prozess wurden die entwickelten Dokumente zunächst einer kritischen fachlichen Durchsicht unterzogen und anschließend im Rahmen von Workshops mit den Wirtschaftspartnern ENW, O.K. Energiehaus, Pöll, RWT und Weissenseer hinsichtlich ihrer Relevanz und Praxistauglichkeit diskutiert und weiterentwickelt.

„In unserer Übergabemappe haben wir Fragen, wie z.B. Wie sind Wohnräume zu lüften? Wie sind Kellerräume zu lüften? Wir haben ganz oft das Thema mit dem Kellerschimmel.“

Interviewpartner 1

„Die Nutzung ist bei uns ein sehr großes Thema. Vor der Bewerbung wird man in einem Video über das Zusammenleben aufgeklärt“

Interviewpartner 2

Die zielgruppenspezifische Unterscheidung der Wartungshandbücher – insbesondere die Ausrichtung auf Mieter:innen, Eigentümer:innen bzw. Gebäudeverwaltungen sowie ausführende Unternehmen – wurde im Zuge dieser Workshops als wesentliches Erfordernis identifiziert.

2.1.3 Entwicklung

Auf Grundlage der vorangegangenen Recherchen wurde deutlich, dass das Nutzungsverhalten der Mieter:innen einen wesentlichen Einfluss auf die Wirksamkeit von Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen hat. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Nutzer:innen aktiv in den Prozess der Bauwerkserhaltung einzubinden und ihre Verantwortung transparent zu machen.

Das in Abbildung 2.2 dargestellte Stufendiagramm strukturiert die beteiligten Akteur:innen und ihre jeweiligen Aufgaben. Berücksichtigt werden Planer:innen, ausführende Unternehmen, Eigentümer:innen bzw. Gebäudeverwaltungen sowie Mieter:innen. Durch die klare Zuordnung von Verantwortlichkeiten wird eine nachvollziehbare Aufgabenverteilung entlang des Lebenszyklus definiert. Ziel ist es, das Bewusstsein zu stärken, dass Wartung kein isolierter Vorgang einzelner Beteiligten ist, sondern ein kooperativer Prozess mit geteilten Verantwortlichkeiten.

Aufgaben der Beteiligten

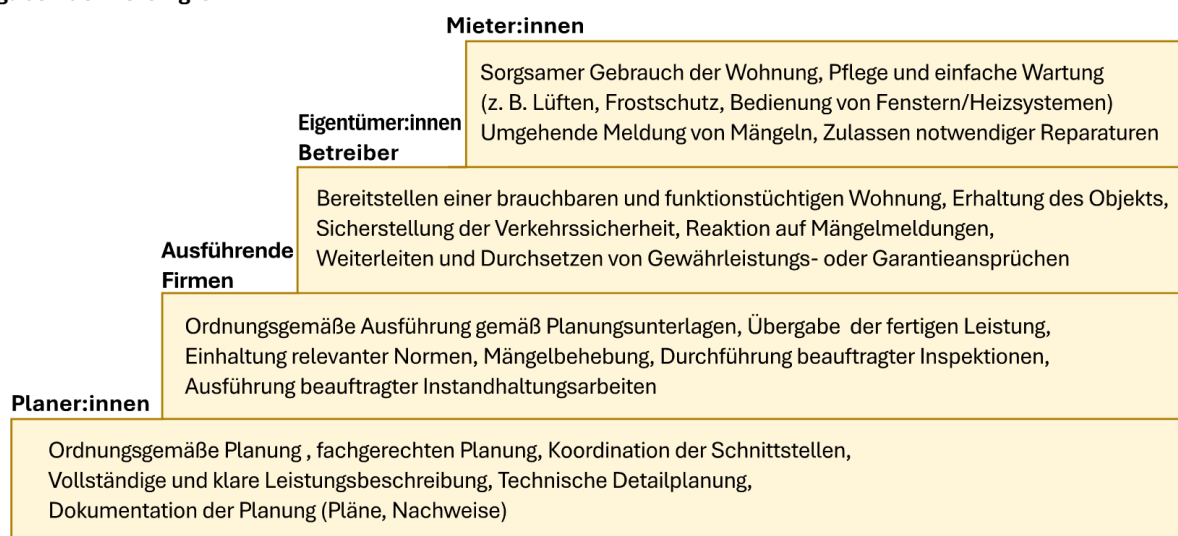


Abbildung 2.2 Aufgaben der Beteiligten während der Nutzungsphase eines Gebäudes

Vor diesem Hintergrund wurde besonderer Wert auf eine differenzierte Aufgabenverteilung zwischen Mieter:innen, Eigentümer:innen bzw. Gebäudeverwaltungen und ausführenden Unternehmen gelegt. Um den unterschiedlichen Kenntnisständen, Handlungsspielräumen und Verantwortungsbereichen gerecht zu werden, wurden **drei eigenständige, zielgruppenorientierte Wartungshandbücher** entwickelt. Die Handbücher gelten für die Anwendung im allgemeinen Hochbau. Holzbauspezifische Anforderungen wurden für einzelne Bauteile eingebunden.

Dabei folgt jedes der drei Handbücher einer einheitlichen Grundstruktur mit zwei Hauptteilen, die jeweils an die spezifischen Anforderungen der Zielgruppen angepasst sind.

Der erste Teil behandelt die sachgerechte Nutzung des Gebäudes und führt in die Grundlagen von Wartung und Instandhaltung ein. Praxisnahe Hinweise zur richtigen Pflege, Reinigung und Nutzungsverhalten – etwa in Hinblick auf richtiges Lüften und Verständnis für Luftfeuchte – vermitteln, wie durch einfache Maßnahmen Schäden vermieden und die Dauerhaftigkeit der Bausubstanz unterstützt werden kann. Ziel ist es, die Beteiligten für die Bedeutung kontinuierlicher Wartung zu sensibilisieren und den Zusammenhang zwischen individuellem Nutzungsverhalten und baulicher Werterhaltung nachvollziehbar darzustellen.

Der zweite Teil des jeweiligen Handbuchs enthält detaillierte Inspektions- und Wartungsanleitungen für die wesentlichen Bauelemente eines Gebäudes. Die Auswahl der Bauelemente basiert auf den durchgeführten Recherchen und bildet das Gebäude in seiner Gesamtheit ab, wie schematisch in Abbildung 2.3 dargestellt. Für jedes Bauelement wurden Inspektionsintervalle und konkrete Maßnahmen definiert und tabellarisch dokumentiert.

Struktur und Aufbau sind in allen drei Wartungshandbüchern identisch, um Vergleichbarkeit und Orientierung zu gewährleisten. Unterschiede bestehen in der sprachlichen Komplexität und im fachlichen Detailgrad: Während das Handbuch für Mieter:innen in klarer, leicht verständlicher Sprache formuliert ist, verwenden die Fassungen für Eigentümer:innen und Gebäudeverwaltungen und jene für ausführende Unternehmen eine fachlich präzisere Sprache und technisch differenzierter Darstellungen.

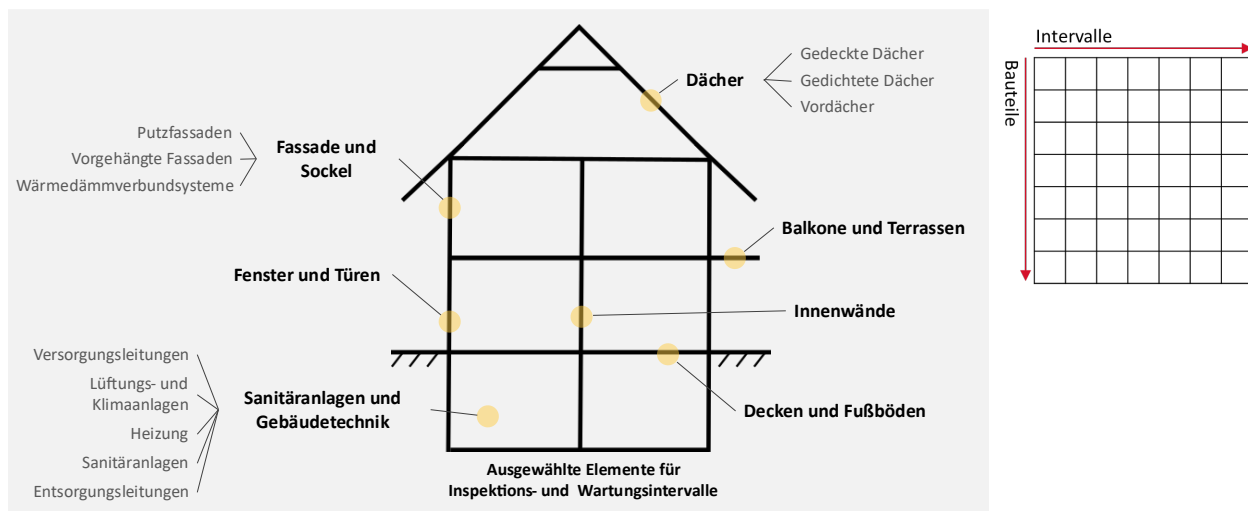


Abbildung 2.3 Ausgewählte Bauelemente für Inspektions- und Wartungsintervalle (links); Strukturaufbau der Inspektions- und Wartungstabellen (rechts)

Je nach Zielgruppe und deren fachlichem Kenntnisstand werden die Inhalte in unterschiedlicher Tiefe aufbereitet. In den Fassungen für Eigentümer:innen und Gebäudeverwaltungen sowie für ausführende Unternehmen wird ergänzend ein eigenes Kapitel „Messtechnik“ integriert. Dieser Abschnitt behandelt technische Kontroll- und Prüfverfahren zur Bewertung des Zustandes von Bauteilen.

Diese differenzierte Ausgestaltung stellt sicher, dass jede Zielgruppe jene Informationen erhält, die für ihren jeweiligen Verantwortungsbereich im Wartungsprozess erforderlich sind, und diese entsprechend ihrer Rolle anwenden kann. Eine zielgruppenorientierte Übersicht zu Struktur und Aufbau der Wartungshandbücher ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

Wartungshandbuch				
Einführung	Grundlagen	Einfluss durch die Nutzung	Messtechnik	Inspektion und Wartung
M E U	M E U	M E U	E U	M E U
Ziele der Bauwerkserhaltung	Gewährleistung und Garantie	Behaglichkeit	Luftfeuchtigkeit und Raumluftqualität	Inspektions- und Wartungsintervalle
Strategien für die Bauwerkserhaltung	Verantwortlichkeiten	Pflege und Reinigung		
	Allgemeines zur Wartung	Richtig Lüften	Holzfeuchtemessung	
	Dokumentation			

Zielgruppen:

- M Mieter:innen
- E Eigentümerinnen und Gebäudeverwaltungen
- U Ausführende Unternehmen

Abbildung 2.4 Struktur und Inhalte der Wartungshandbücher der jeweiligen Zielgruppe zugeordnet

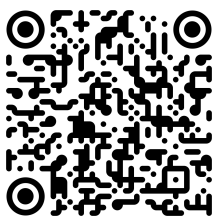
2.2 Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden **drei eigenständige, zielgruppenorientierte und materialübergreifende Wartungshandbücher** entwickelt.

Eine wesentliche Neuerung ist die zielgruppenspezifische Differenzierung: Diese Handbücher richten sich an Mieter:innen, Eigentümer:innen und Gebäudeverwaltungen sowie ausführende Unternehmen und bieten allen Nutzer:innen eine praxisnahe Anleitung zur präventiven Wartung und Instandhaltung. Die Wartungshandbücher machen eine ressourceneffiziente Instandhaltung verständlich und durch einfach aufgebaute und klar strukturierte Anleitungen können alle Zielgruppen die empfohlenen Maßnahmen ohne weitere Unterlagen umsetzen.

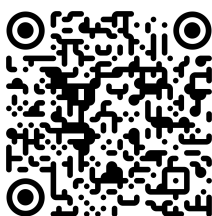
Der Innovationsgehalt des Projekts liegt auch in der praxisnahen Entwicklung eines strukturierten Wartungshandbuchs, das präventive Instandhaltungsmaßnahmen mit festgelegten Intervallen verknüpft. Ein wesentliches Ergebnis ist, dass das entwickelte Handbuch für alle Materialien anwendbar ist – auch für den Holzbau.

Die Wartungshandbücher können digital über die Links und QR-Codes abgerufen werden. Alternativ können sie über folgende Links abgerufen werden:



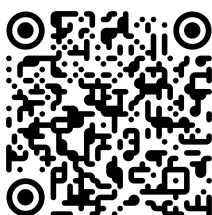
Katharina Schachner, Markus Wallner-Novak: Sys.Wood: Wartungshandbuch Mieter. Hintergrunddokumentation.

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_wartung_mieter



Katharina Schachner, Markus Wallner-Novak: Sys.Wood: Wartungshandbuch Verwalter. Hintergrunddokumentation.

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_wartung_verwalter



Katharina Schachner, Markus Wallner-Novak: Sys.Wood: Wartungshandbuch Ausführende. Hintergrunddokumentation.

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_wartung_ausfuehrende

2.3 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Das Forschungsprojekt zeigt, dass regelmäßige und systematische Wartung einen wesentlichen Beitrag zum langfristigen Werterhalt von Hochbauten leistet. Durch die konsequente Umsetzung präventiver Instandhaltungsmaßnahmen kann die Lebensdauer von Bauteilen deutlich verlängert werden. Daraus ergeben sich sowohl ökologische Vorteile durch Ressourcenschonung als auch ökonomische Effekte infolge verminderter Instandsetzung- und Sanierungskosten.

Die im Projekt erarbeiteten Erkenntnisse sowie die Entwicklung zielgruppenorientierter Wartungshandbücher adressieren eine bislang häufig vernachlässigte Lücke in der Instandhaltungspraxis. Durch klar strukturierte und praxisnahe Anleitungen für Mieter:innen bzw. Nutzer:innen, Eigentümer:innen und Gebäudeverwaltungen sowie ausführende Unternehmen wird eine unmittelbare Anwendung ermöglicht. Gleichzeitig wird das Verständnis für Wartung als integraler Bestandteil der lebenszyklusorientierten Baupraxis gestärkt. Darüber hinaus eröffnet der Bereich der präventiven Instandhaltung **neue fachliche Tätigkeitsfelder**, die im Kontext nachhaltiger Bestandsnutzung weiter an Bedeutung gewinnen werden.

Ein wesentlicher weiterer **Forschungsbedarf** besteht in der digitalen Transformation der erarbeiteten Inhalte zur digitalen Bauwerkserhaltung. Bereits bei der Konzeption der Handbücher wurde eine systematische, modular aufgebaute Struktur gewählt, die eine digitale Implementierung erleichtert. Die bestehende Gliederung bildet die Grundlage für digitale Anwendungen, mit der Wartungsprozesse verwaltet, dokumentiert und archiviert werden können. Zukünftige Forschungsvorhaben könnten die Entwicklung einer digitalen Plattform oder Anwendung vertiefen, welche die Inhalte interaktiv nutzbar macht und Wartungsmaßnahmen im Gebäudebetrieb effizienter, transparenter und nachvollziehbar gestaltet.

3 Holzbau in der Kreislaufwirtschaft – Reuse

In diesem Kapitel werden Strategien zur Förderung der Kreislauffähigkeit im Holzbau untersucht. Ausgehend von einer Analyse realisierter Best-Practice-Projekte werden Anforderungen an zerlegbare Fügungen definiert, projektbezogen entwickelte sowie industriell gefertigte Verbindungslösungen systematisch verglichen und das Potenzial vertikaler Vorspannsysteme für die Wiederverwendung analysiert.

3.1 Kreislaufwirtschaft, Zerlegbarkeit und Wiederverwendung im Holzbau

Die Transformation des Bauwesens von linearen Stoffströmen hin zu einer Kreislaufwirtschaft stellt eine zentrale Voraussetzung der Bauwende dar. Auch der Holzbau unterliegt forstlichen Systemgrenzen. Die aktuelle österreichische Waldinventur weist aus, dass rund 97 % des nachhaltig verfügbaren Holzzuwachses genutzt werden. Zusätzliche Steigerungen des Holzeinschlages sind innerhalb der nachhaltigen Nutzungsgrenzen nur eingeschränkt möglich [18].

Der Endbericht „*HolzKreislauf*“ zeigt anhand von Szenarien, dass eine Erhöhung des Marktanteils von Holz als tragendem Baustoff im Hochbau von derzeit rund 22 % auf 50 % ohne konsequente Kreislaufführung zu einem zusätzlichen Holzbedarf von etwa 0,5 – 1 Mio. Festmeter jährlich führen würde. Bezogen auf den gegenwärtigen Inlandseinsatz von rund 1,4 Mio. Festmeter Bauprodukte aus Holz pro Jahr entspräche dies einer Steigerung von etwa 36 bis 70 % [19]. Die Relation stellt eine Näherung dar, da Produktions-, Export- und Rohholzäquivalente nicht vollständig deckungsgleich sind. Gleichzeitig wird festgestellt, dass **Reuse** und **Remanufacture** bislang eine untergeordnete Rolle spielen und insbesondere wiederlösbare Verbindungen als zentrale technische Voraussetzung für eine wirksame Kreislaufführung gelten.

Wiederverwendung ist damit keine nachgelagerte End-of-Life-Option, sondern eine strukturelle Voraussetzung zur Entkopplung von Holzbauwachstum und Primärressourceneinsatz. Durch zerlegbare Fügungen und verwertungsorientierten Rückbau können Bauteile rückgebaut, erneut eingesetzt und die biogene Kohlenstoffspeicherung über mehrere Nutzungszyklen im technischen Kreislauf erhalten werden. Kreislauffähiger Holzbau erfordert folglich eine konstruktive, organisatorische und digitale Berücksichtigung bereits in frühen Entwurfs- und Planungsphasen.

3.2 Zieldefinition

Der Fokus liegt auf der Wiederverwendung von Holzbauteilen und den zugehörigen Anforderungen an die Fügung der Bauteile im Holzbau. Anhand verschiedener Betrachtungen soll das Thema Kreislaufwirtschaft für die Praxis greifbar gemacht werden.

Auf der Grundlage umfassender Recherchen wurde ein Katalog aus Best-Practice-Beispielen zusammengestellt, der Lösungen für kreislauffähige Projekte zusammenfasst und als Inspiration dient. Weiters werden Verbindungen systematisch eingeordnet und Fügungskonzepte im Holzbau hinsichtlich ihres Kreislauffähigkeitspotenzials analysiert.

Im Projekt wird zwischen projektbezogen entwickelten lösbaren Detailverbindungen und standardisierten lösbaren Systemverbindern unterschieden. Während erstere aus klassischen Holzbauprinzipien abgeleitet und objektspezifisch angepasst werden, beruhen letztere auf industriell vorgefertigten, geprüften Verbindungselementen mit definierten Last- und Montageparametern. Es werden also „projektbezogene zerlegbare Verbindungen“ und standardisierte „zerlegbare Systemverbinder“ vorgestellt.

Für die Wiederverwendung besonders geeignet wurde die vertikale Vorspannung vertiefend analysiert. Durch Orientierungsversuche sollen dazu genauere Erkenntnisse gewonnen werden und der Proof-of-Concept erfolgen.

3.3 Best-Practice-Beispiele

3.3.1 Recherche

Zu Beginn der Bearbeitung wurde eine strukturierte Recherche zum aktuellen Stand kreislauffähiger Holzbauten und ihren Konzepten durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wiederverwendung von Bauteilen im Holzbau nicht mehr ausschließlich Gegenstand theoretischer Konzepte ist, sondern in ersten realisierten Projekten praktisch erprobt wurde. Dabei werden sowohl wiederkehrende Herausforderungen als auch konstruktive Lösungsansätze identifiziert.

„Ausgehen muss man von dem, was ist.“

Werner Sobek

Im Rahmen des Projekts erfolgte daher eine systematische Analyse bereits umgesetzter, kreislaforientierter Holzgebäude in Europa mit Schwerpunkt auf der DACH-Region. Untersucht wurden insbesondere konstruktive Prinzipien, Verbindungstechnologien, Rückbaubarkeit, Materialtrennung sowie organisatorische Rahmenbedingungen. Die aus diesen Pionierprojekten gewonnenen Erkenntnisse wurden strukturiert und gleichbleibender Form ausgewertet und unter dem Begriff „Lessons Learned“ zusammengefasst. Diese dienen als Wissensgrundlage für die Weiterentwicklung kreislauffähiger Holzbaukonzepte im Projektkontext.

Wann kann ein Projekt als kreislauffähig gelten?

Im Rahmen der Erstellung des Best-Practice-Katalogs wurde Kreislauffähigkeit nicht ausschließlich über einen bereits vollzogenen Rückbau definiert, sondern als Kombination aus konstruktiver Reversibilität, Wiederverwendungspotenzial und systemischer Ausrichtung auf mehrfache Nutzungszyklen verstanden.

Die untersuchten Projekte wurden daher drei Kategorien zugeordnet:

- **Kategorie 1 – Realisierte Wiederverwendung:** Holzgebäude, die bereits rückgebaut und an anderer Stelle oder in veränderter Konfiguration wieder errichtet wurden (ein- oder mehrmaliger Nutzungszyklus).
- **Kategorie 2 – Kreislaufgerecht geplant:** Holzgebäude, die nachweislich nach Prinzipien des „Design for Disassembly“ bzw. „Design for Adaptability“ geplant wurden, sich jedoch noch im ersten Nutzungszyklus befinden.
- **Kategorie 3 – Gebäude mit Reuse-Bauteilen:** Holzgebäude, die ganz oder teilweise aus wiederverwendeten Bauteilen (Reuse) bestehen, unabhängig davon, ob das Gesamtgebäude selbst erneut demontierbar ist.

Insgesamt wurden mehr als 20 Projekte nach dem in Abbildung 3.1 abgebildeten Schema analysiert. Die Projekte wurden hinsichtlich deren Bauweise und Nutzung geclustert. Folgende Unterscheidungen wurden dabei vorgenommen:

- Bauweise:
 - Holzleichtbauweise:
 - Holzskelettbau/Ingenieurskelettbau
 - Holzrahmenbauweise
 - Holzmodulbauweise/Raumzellenbauweise
 - Holzmassivbauweise:
 - Brettsper Holzbauweise
 - Holzmodulbauweise/Raumzellenbauweise
- Nutzung:
 - Bildungsbauten (z.B. Kindergarten, Schulen, Universitäten)
 - Wohnbauten (z.B. mehrgeschoßiger Wohnbau)
 - Bürobauten (z.B. Parlamente, Bürogebäude)
 - Weitere öffentliche Bauten (z.B. Veranstaltungsgebäude, Sportstätten, Theater)

1
15 Campus Diemerstein



2

3

Standort: Diemerstein, GER
Viktor Poteschin
 t-lab Holzarchitektur und Holzwerkstoffe
 Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graf
 Prof. Stephan Birk
Projektleitung: Marcel Balsen,
 Viktor Poteschin
 Oliver Betha mit Studierenden der RPTU
 Kaiserslautern
Baudurchführung: Drees & Sommer Advanced Building Tech.,
 IBC Ingenieurbau-Consult GmbH,
 TH Bingen, Bildungsbau
Konsulten:
 1. **Nutzungsart:** 1. Nutzungsdauer: 2024-offen
 2. **Nutzungsart:** Noch offen
 3. **Nutzungsart:** Noch offen
Bauweise: Holzskelett, Holzmassivbauweise

© t-lab ⁴⁴ Andreas Labes Fotografie, Berlin

Die Werk- und Forschungshalle Diemerstein des t-lab (RPTU Kaiserslautern-Landau) stellt ein Best-Practice-Beispiel für vollständig kreislauffähiges Bauen im Holzbau dar. Das zentrale Ziel war eine zerstörungsfreie Demontierbarkeit und damit Werthaltigkeit aller Elemente umzusetzen.

Das architektonische und konstruktive Herzstück der 360 m² großen Halle bildet ein Primärtragwerk aus Dreiecksknoten. Diese bestehen aus leistungsfähigem Buchenurnierschichtholz und sind in einem flexiblen 2,5-Meter-Raster angeordnet. Ein besonderes technologisches Highlight sind die neuartigen Ringknoten aus Kunstharzpressholz (KP). Diese technisch geformten Bauteile leiten sich von der natürlichen Gestalt von Astgabeln ab. Durch große Rundungsradien ermöglichen sie eine stetige Kraftumlenkung, wodurch Spannungsspitzen vermieden werden und die statische Leistungsfähigkeit bei filigraner Ästhetik steigt. KP erreicht eine stahlähnliche Druckfestigkeit und ist damit ideal geeignet für den Einsatz in Knotenpunkten mit Spannungskonzentrationen. Um die vollständige Reversibilität aller Verbindungen zu garantieren, wurde auf Verklebungen verzichtet. Die Fügungen wurden konsequent formschlüssig konstruiert, das vor allem im Holzbau ideal ist für demontierbare Anschlüsse. Die Ringknoten werden über Schraubverbindungen axial in Richtung der Baubuchensstäbe mit diesen vorgespannt. Für den Anschluss der aussteifenden

4

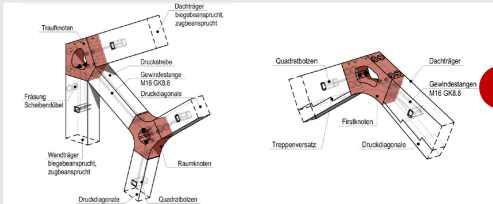
⁴⁴ <https://t-lab.architektur.rptu.de/campus-diemerstein>

44

Wand- und Dachelemente an das Tragwerk wurde der sogenannte Konusadapter entwickelt. Diese ebenfalls aus KP gefertigten, kegelförmigen Verbinder erlauben eine präzise Kraftübertragung durch Formschluss und bleiben auch nach Jahrzehnten dauerhaft lösbar. Diese Detailausbildung ist als universelle Lösung konzipiert, die auch auf mehrgeschossige Gebäude übertragbar ist. Auch bei der Gründung und der Gebäudehülle wird der Kreislaufgedanke konsequent verfolgt:

- **Fundament:** Statt einer irreversiblen Bodenplatte aus Stahlbeton wurde eine auf Mikro-Bohrpfählen aufgeständerte, reversible Stahlträgerlage verbaut. Darauf liegt die Bodenplatte aus Brettspertholz-Elementen (BSP), die nach dem Prinzip eines Kriechkellers luftunterspült angeordnet sind, um dauerhaften Holzschutz ohne Chemie zu gewährleisten.
- **Hülle:** Der Wand- und Dachaufbau ist elementiert und sortenrein trennbar. Der Aufbau der Außenwände ist nach Funktion getrennt in: tragend, dämmend und wasserabweitend. Jede Schicht ist reversibel miteinander verbunden.

Neben dieser Halle arbeitet das t-lab an weiteren Konzepten zur Kreislauffähigkeit im Holzbau. Dazu zählt u.a. das Forschungsprojekt „Wandelbarer Holzhybrid“⁴⁵ in dem ein nutzungsflexibles, reversibles 7-geschoßiges Holzgebäude erforscht wurde.



5

Darstellung der Knotenpunkte der Dreiecksknoten⁴⁵

Lessons Learned:

- 6** • Der Campus Diemerstein liefert konkrete, skalierbare Lösungsansätze für die Herausforderungen der Ressourcenwende
- Im kreislauffähigen Holzbau werden formschlüssige Verbindungen eine entscheidende Rolle spielen

⁴⁵ <https://t-lab.architektur.rptu.de/forschungsprojekte/Wandelbarer-Holzhybrid>

45

Abbildung 3.1 Strukturierte Darstellung eines Best-Practice-Projektes mit den wesentlichen Analyse- und Dokumentationselementen. 1 Projekttitel, 2 Referenzbild des Projektes, 3 Grundinformationen 4 Kurzbeschreibung des Projektes, 5 Detailbilder und weitere Darstellungen, 6 Lessons Learned

3.3.2 Ergebnisse

Die für die Best-Practice-Sammlung ausgewählten Projekte erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern stellen eine gezielte Stichprobe bereits realisierter bzw. aktuell in Genehmigung befindlicher kreislauffähiger Holzbauprojekte dar. Ziel der Auswertung war es, anhand dieser Auswahl wiederkehrende Muster und Entwicklungstendenzen hinsichtlich Bauweise, Nutzungskonzept und konstruktiver Ausführung zu identifizieren.

Auf Grundlage der zuvor definierten drei Kategorien der betrachteten Projekte ergibt sich folgendes Bild. Hinsichtlich der Bauweise zeigt sich bei bereits im Kreislauf geführten Projekten („K1 – realisierte Wiederverwendung“) kein deutlicher Trend. Diese Projekte sind überwiegend der Nutzung „weitere öffentliche Bauten“ zuzuordnen und decken daher ein breites Spektrum an Nutzungen ab. In der Kategorie „K2 – Kreislaufgerecht geplant“ zeigt sich ein deutlicher Trend hin zu Bürobauten, die als Ingenieurskelettbau errichtet wurden. An zweiter Stelle folgen Wohnbauten und Bildungsbauten. Bildungsbauten weisen aufgrund der ähnlichen funktionalen Anforderungen vor allem als Raummodule ein hohes Kreislauffähigkeitspotenzial auf. Der Umfang der betrachteten Projekte in Kategorie 3 – „Gebäude mit Reuse Bauteilen“ ist zu gering, um qualitative Trends ableiten zu können.

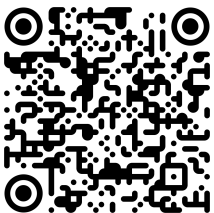
Lessons Learned

Aus der Analyse der untersuchten Projekte konnten zahlreiche übertragbare Erkenntnisse abgeleitet werden. Eine detaillierte Aufbereitung ist im begleitenden Hintergrunddokument enthalten; nachfolgend werden zentrale Ergebnisse zusammengefasst:

- **Temporäre Gebäude** sollten bereits in der Erstplanung auf weitere Nutzungszyklen ausgelegt werden. In mehreren Fällen führte diese vorausschauende Planung zu einer signifikanten wirtschaftlichen Optimierung; Einsparungen von bis zu 15 % der Projektkosten wurden dokumentiert.
- **Wiedernutzung bedeutet nicht zwingend identische Nutzung.** Durch moderate konstruktive Anpassungen am Tragwerk können unterschiedliche

Nutzungsanforderungen in aufeinanderfolgenden Zyklen realisiert werden. Ergänzende Bauteile, beispielsweise Stahlstützenfüße oder austauschbare Verbindungselemente erhöhen die Anpassungsfähigkeit bestehender Strukturen und ermöglichen zusätzliche Nutzungszyklen.

- **Modulare Bauweisen**, insbesondere Raummodule im Bildungsbereich, zeigen ein hohes Potential für Nutzung in der Kreislaufwirtschaft. Aufgrund ähnlicher funktionaler Anforderungen können Raummodule relativ einfach versetzt, neu kombiniert oder erweitert werden. Dies ist unabhängig davon, ob es sich um Neubauten oder Zubauten handelt. Mehrere realisierte Beispiele bestätigen diese Eignung.
- Im Bereich der **Fügungstechnologien** ist ein deutlicher Trend zur formschlüssigen Kraftübertragung zu erkennen. Digitale Fertigungsmethoden wie Computerized Numerical Control (CNC)-Fertigung und Robotik ermöglichen eine wirtschaftliche Herstellung präziser Geometrien und können arbeitsintensive Montageprozesse kompensieren. Formschlüssige Verbindungen erfordern eine passgenaue Ausführung und haben im Holzbau eine lange Tradition (z.B. Versätze, Aufklauungen und Kerven). Die Anforderung an die Passgenauigkeit stellt insbesondere den Holz-Hybridbau vor Herausforderungen, da die unterschiedlichen Baustoffe mit unterschiedlichen Bauleranzen ausgeführt werden.
- Aus Sicht der Kreislauffähigkeit ist daher eine Reduktion erforderlicher Bauleranzen anzustreben. Eine zentrale Strategie hierfür ist die **konsequente Vorfertigung im Werk** – materialübergreifend – um Maßgenauigkeit, Demontierbarkeit und Wiederverwendbarkeit systematisch zu verbessern.



Alireza Fadai, Alexander Gerger, Fabian Ulrych, Marius Valente: Sys.Wood: Best Practice Kreislaufwirtschaft. Hintergrunddokumentation.

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bestpracticekreislauf

3.4 Kreislauffähige Fügungen im Holzbau

Die Erkenntnisse aus der Analyse der Best-Practice-Beispiele bildeten die Basis für eine vertiefende Betrachtung der Fügungen im Holzbau. Die Verbindungen im Holzbau sind vielfältig und unterscheiden sich grundsätzlich hinsichtlich der Bauweise und der Lastübertragung. Ausgehend von den drei Übertragungsmechanismen für Fügungen im Holzbau – Formschluss, Kraftschluss und Stoffschluss – bieten die jeweiligen Ausführungen unterschiedliche Potenziale für Kreislauffähigkeit. Die Betrachtung erfolgt gegliedert nach Bauweise und dominierender Lastübertragung für verschiedene Holzleichtbauweisen und Holzmassivbauweisen.

3.4.1 Anforderungen

Der moderne Holzbau setzt überwiegend auf stiftförmige metallische Verbindungsmittel (Schrauben, Nägel, Stabdübel, etc.). Diese haben sich konstruktiv über die vergangenen Jahrzehnte bewährt, stehen jedoch aufgrund neuer Anforderungen durch Reuse vor Herausforderungen.

Damit Kreislaufwirtschaft im Bauwesen funktioniert, müssen ökonomische und technische Anforderungen erfüllt werden. Kreislauffähige Verbindungen dürfen nicht zu komplex werden, sondern müssen so einfach wie möglich herstellbar und montier- bzw. demontierbar sein, um ökonomisch konkurrenzfähig zu sein. Aus technischer Sicht gilt es vor allem zwei Anforderungen zu erfüllen: das **Intakt bleiben der Bauteile** und die **Lösbarkeit der Verbindung**.

Intakt bleiben der Bauteile bedeutet, dass die Bauteile nicht nur den Beanspruchungen durch Einwirkungen über die Nutzungsdauer widerstehen müssen, sondern darüber hinaus auch nicht durch die Demontage der Verbindung „geschädigt“ werden dürfen. Daraus ergeben sich Fragen hinsichtlich von Störstoffen (z.B. abgerissene Schrauben), der wiederholten Tragfähigkeit von Schraubenantrieben und Gewindegängen oder plastisch verformter Bereiche im Holz (siehe Abbildung 3.2).

Lösbarkeit der Verbindung bedeutet, dass diese auch nach einer geplanten Nutzungsdauer von 50 oder mehr Jahren noch gegeben ist. Das bedeutet, dass die Verbindungen mit einer Überfestigkeit auszulegen sind und das Niveau der Tragfähigkeit zu begrenzen ist. Eine erhöhte Beanspruchung kann beispielsweise zu gekrümmten Verbindungsmittelachsen, oder anderen plastischen Verformungen führen, die die Demontage erschweren. (siehe Abbildung 3.2).

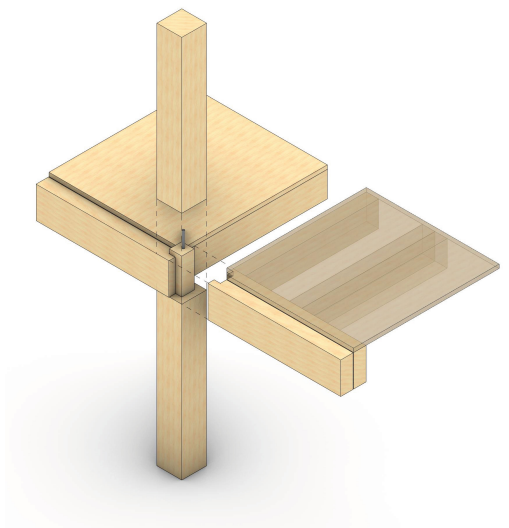
Ausgehend von diesen allgemeinen Anforderungen erfolgt eine detaillierte Betrachtung entsprechend der jeweiligen Bauweisen. Die spezifischen Anforderungen je Bauweise und Anschlusspunkt werden auf zwei Ebenen thematisiert: einerseits anhand von projektbezogen entwickelten lösbaren Detailverbindungen und andererseits durch standardisierte lösbare Systemverbinder.



Abbildung 3.2 Herausforderungen im kreislauffähigen Bauen: Abreißen des Schraubenkopfes (links) [20], Verkrümmung der Stabachse durch Scherbeanspruchung (rechts) [21]

3.4.2 Projektbezogene zerlegbare Verbindungen

Ein Kapitel beschäftigt sich bspw. mit dem Ingenieurskelettbau. Im Gegensatz zum Stahlbetonbau stellen Flachdecken im Holzbau eher die Ausnahme als den Standardfall dar. Durch Unterzüge aus Vollholz oder Brettschichtholz wird wertvolle Raumhöhe eingeschränkt, wodurch im reinen Holzbau im Vergleich zum Stahlbetonbau mitunter die Anzahl der umsetzbaren Geschoße leiden kann. Das Bestreben nach Flachdecken im Holzbau führte zu hybriden Ansätzen mit Unterzügen aus Stahl oder Stahlbeton [22] bzw. Lösungen durch Querdruckverstärkung der Decke bspw. mittels langer Vollgewindeschrauben. Viele aktuelle umgesetzte



In diesem Projekt wird der Stützen-Decken-Knoten als Art Zapfenverbindung ausgebildet. Damit kann der erforderliche Platzbedarf durch die Konstruktion minimiert werden. Der Kopf der Stützen wird als Zapfen ausgebildet, wodurch ein Teil der Querschnittsfläche zur Auflagerung der Unterzüge entsteht. Im Brandnachweis ist auf eine ausreichende verbleibende Auflagerfläche zu achten. Dies ist ohne Einsatz einer Sprinkleranlage eine Herausforderung. Die Unterzüge sind bereits Teil der Deckenelemente, wodurch Decke und Knoten in einer Ebene liegen. Der Zapfen ist somit gegenüber Brand durch die Deckenelemente geschützt. Die Lagesicherung der Stützen erfolgt mittels Dorn.

Abbildung 3.3 Darstellung eines demontierbaren Stützen-Decken-Knoten im Ingenieurskelettbau für reinen Holzbau am Beispiel des Projekts 543 Hortus

kreislauffähige Bauprojekte sind Bürogebäude, die als Ingenieurskelettbau geplant werden. Dieser Herausforderungen, der Lastdurchleitung durch Decken im Ingenieurskelettbau, wurden in den Projekten des Best-Practice-Katalogs auf vielfältige Weise individuell begegnet. In Abbildung 3.3 ist eine exemplarische Lösung für reinen Holzbau abgebildet.

3.4.3 Kreislauffähige Systemverbinder

Manche dieser Herausforderungen sind projektunabhängig (grundlegend) und betreffen daher ein großes Publikum. Für diese Art der Herausforderungen haben Verbindungsmittelhersteller bereits vielfach Lösungen entwickelt. Diese Lösungen werden jeweils in den Abschnitten „standardisierte lösbare Systemverbinder“ vorgestellt und verglichen. Die Gliederung der Systemverbinder erfolgt nach Art des Übertragungsmechanismus (Formschluss, Kraftschluss, Stoffschluss), der Art der zu verbindenden Bauteilen (Stab, Fläche) und der Beanspruchungsart (Druckkräfte, Scherkräfte, etc.). Thematisiert werden: Trägeranschlüsse, Anschlüsse punktgestützter Flachdecken, Abhebesicherungen von Wänden und Scherverbinder zwischen Flächenelementen (Wände, Decken). Die Auflistung kreislauffähiger Bauprodukte verfolgt das Ziel, die Bandbreite bereits verfügbarer Produkte aufzuzeigen.

Nach der Analyse des Status quo wird ein Blick in die Zukunft geworfen und ergänzend zu den bereits verfügbaren Produkten, aktuelle Forschungen in dem Gebiet diskutiert.

3.4.4 Systemvergleich

Im letzten Abschnitt erfolgt eine vergleichende Orientierungsrechnung für 3 Konzepte der Fügung einer Aussteifungswand. Verglichen werden eine klassische Fügung mit Zugankern und Schubwinkeln, und demontierbare Konzepte mittels Ringverbindern bzw. vertikaler Vorspannung. Ziel ist die Anwendungsgrenzen hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Platzbedarf anhand einer vereinfachten Referenzrechnung gegenüberzustellen.

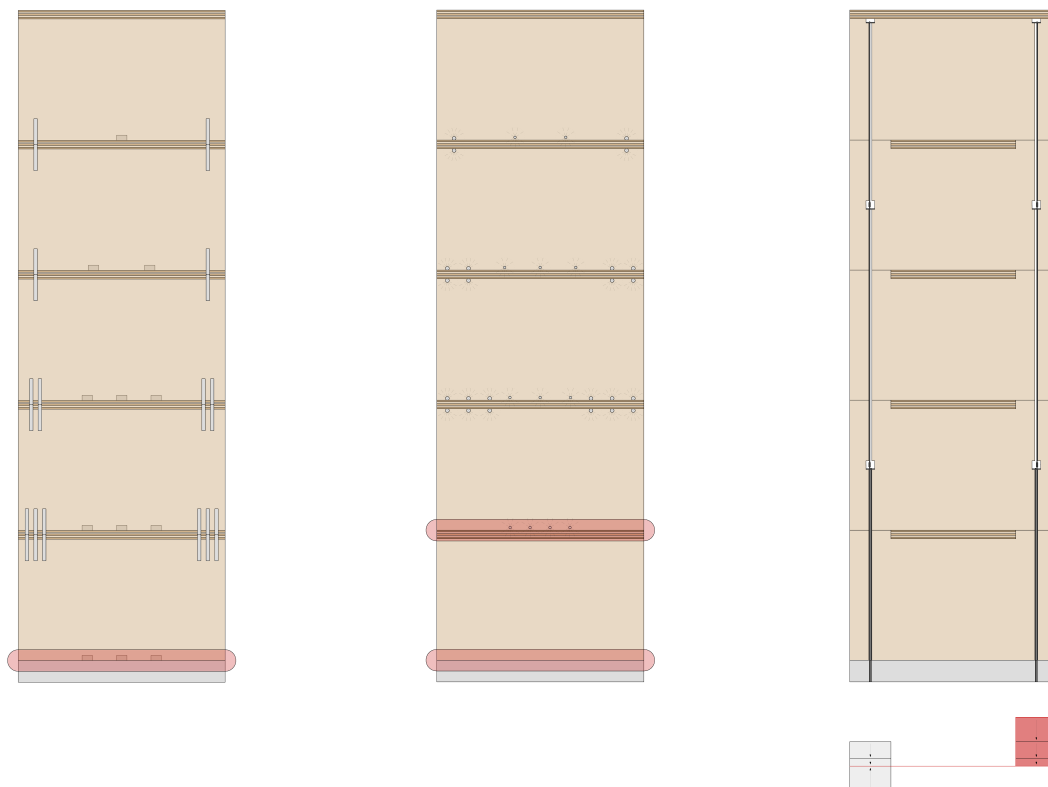
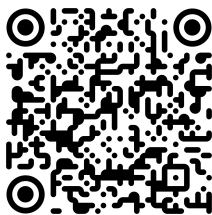


Abbildung 3.4 Vergleichende Orientierungsrechnung: betrachtete Konfigurationen – Zuganker und Schubwinkel (links), Ringverbinder (mitte) und vertikale Vorspannung (rechts)

3.4.5 Ergebnisse

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Anforderungen, die durch die Kreislaufwirtschaft entstehen in allen Bereichen neue Strategien erfordern. u. a. folgende:

- Planer
 - Ein neuer Umgang mit duktilem Tragwerksverhalten. Reversible Verbindungen sollten im Allgemeinen im elastischen Bereich bleiben, da die Verbindungsmittel sonst in vielen Fällen plastische Verformungen aufweisen und die Demontage so erschweren. Capacity Design mit austauschbaren Fuse-Elementen (Überkapazitätselemente) bezeichnet ein Entwurfskonzept, bei dem plastische Verformungen gezielt in definierten, ersetzbaren Verbindungselementen konzentriert werden, während die tragenden Holzbauteile im elastischen Bereich verbleiben und somit für weitere Nutzungszyklen erhalten bleiben [23]. Die duktilen Elemente sollten ebenfalls austauschbar geplant werden (z. B. Dissipatoren aus Gummi, U-shaped flexural Plates (UFPs), Gleitreibungsverbindungen etc.)
 - Scherbeanspruchte Verbindungen sollten entweder für den elastischen Bereich dimensioniert werden oder es sollten entsprechende Räume zur plastischen Verformung vorgesehen werden (z. B. UFP-Verbinder)
 - Schrauben in Fügungen sollten möglichst axial beansprucht werden (z. B. durch geneigte oder radiale Anordnung), da bei axialer Beanspruchung in der Regel höhere Tragfähigkeiten sowie ein günstigeres, überwiegend duktiler Versagensverhalten erzielt werden. Gleichzeitig ist die Einbindelänge zu begrenzen [24]. Bei großen Einbindelängen (ab etwa 200 mm bis 300 mm) kann der Herauszieh Widerstand infolge der zunehmenden Verzahnung und Adhäsion zwischen Gewindeflanken und der ligninreichen Holzmatrix stark ansteigen. In diesem Fall wird die Tragfähigkeit nicht mehr durch das Versagen im Holz, sondern durch die Stahltragfähigkeit begrenzt, sodass es zu einem spröden Versagen durch Abreißen des Schraubenkopfes oder des Schraubenschaftes kommen kann.
- Hersteller:
 - Durch eine Reduktion der erforderlichen Anzahl an Schrauben kann die Kreislauffähigkeit gefördert werden
 - Reibungs-, Kriech- und Haltbarkeitsprobleme wie Korrosion können die Demontage beeinträchtigen und müssen bereits in der Planung berücksichtigt werden.
- Ausführung:
 - Formschlüssige Verbindungen weisen grundsätzlich eine hohe Kreislauffähigkeit auf. Diese Fügungsart erfordert jedoch eine passgenaue Herstellung und lässt praktisch keine Baulöcher zu. Die Baulöcher können durch reine Bauweisen (z.B. nur Holz) und einen hohen Vorfertigungsgrad gefördert werden



Alireza Fadaei, Alexander Gerger, Jasmin Prünner, Marius Valente: Sys.Wood:

Sys.Wood: Zerlegbare Verbindungen im Holzbau. Hintergrunddokumentation.

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_zerlegbare_verbindungen

3.5 Vertikal vorgespannte Wände

3.5.1 Anwendung und Zielsetzung

Brettspertholz (BSP) ermöglicht durch seine millimetergenaue Vorfertigung, den kreuzweise gesperrten Aufbau und die hohe Formstabilität bei Feuchteänderungen eine konsequente Nutzung der Vorteile industrieller Fertigung. Die hohe Steifigkeit und Tragfähigkeit von BSP-Wänden machen diese Bauteile besonders geeignet für tragende und aussteifende Funktionen im mehrgeschoßigen Holzbau.

Nationale und internationale Referenzprojekte im urbanen Holzbau zeigen, dass die horizontale Aussteifung überwiegend über Scheibenwirkung von Schubwänden erfolgt, die in einigen Fällen mit Treppenhauskernen kombiniert werden. Mit der zunehmenden Etablierung von Mischbauweisen – insbesondere mit einem höheren Anteil an Holzrahmenkonstruktionen in den Außenwänden – verändert sich jedoch die Lastverteilung innerhalb des Gebäudes. Horizontale Einwirkungen werden nicht mehr gleichmäßig auf eine Vielzahl von Wandscheiben verteilt, sondern konzentrieren sich auf eine geringere Anzahl von Wandscheiben als primäre Aussteifungselemente. Diese übernehmen entsprechend höherer Beanspruchungen und stellen erhöhte Anforderungen an Steifigkeit, Verformungsbegrenzung und Anschlussausbildung.

Hohe Zug- und Druckbeanspruchungen erfordern in der Regel eine zentrische Kraftübertragung in der Mittelachse der Wandelemente, um Exzentrizitäten und zusätzliche Biegemomente zu vermeiden. Typische projektbezogene Detailausbildungen betreffen dabei den T-Stoß von Wand–Decke–Wand sowie die Verankerung der Wand in die darunterliegende Stahlbetonkonstruktion.

Zu den häufigsten Ausführungsvarianten zählen beidseitige Blechformteile mit außenliegenden ebenen Blechen und innenliegenden Winkeln als Systemverbinder (Zuganker und Schubwinkel). Darüber hinaus kommen Lösungen mit eingeschlitzten T-Stahlprofilen in Kombination mit vorgebohrten oder selbstbohrenden Stabdübeln zum Einsatz, wobei der Steg des T-Profiles in der Mittelachse der Wandscheibe angeordnet ist. Eine weitere Variante stellen an den Wandenden konzentriert angeordnete Schraubenkreuze in der Vertikalebene quer zur Wandebene dar, die primär der Übertragung von Zugkräften dienen. Weitere Entwicklungen sind Anker, die in ein in die Wand eingelassene Hülse einrasten (Abbildung 3.5).

Alle genannten Lösungen haben gemeinsam, dass sie in Hinblick auf einen späteren Rückbau nur eingeschränkt zugänglich und meist aufwendig lösbar sind. Zudem erfordern sie in der Regel eine Zugänglichkeit von beiden Seiten der Wandelemente. Hinsichtlich des Tragverhaltens ist festzustellen, dass diese etablierten Anschlusslösungen überwiegend für den Traglastzustand bemessen werden. Die resultierende Systemsteifigkeit der Wandscheibe in Kombination mit den Verbindungen erreicht dabei häufig nur etwa ein Zehntel der Steifigkeit der Wandscheibe selbst [25].

Ziel ist daher die Weiterentwicklung und Anwendung eines Systems, das eine einfache Herstellung, eine hohe Systemsteifigkeit sowie eine verbesserte Demontierbarkeit ermöglicht. Auf Basis von Referenzprojekten und wissenschaftlichen Untersuchungen wurde das Konzept vertikal vorgespannter Wandscheiben als geeigneter Ansatz identifiziert. Dieses Prinzip wird auch in der Betonfertigteilbauweise als Optimierungspotenzial diskutiert [26].

Die angestrebten Wirkprinzipien sind:

- Verhinderung des Klaffens von Anschlussfugen durch gezielte Druckvorspannung
- Vereinfachung von Fugen- und Anschlussdetails
- Aktivierung von Reibung zur Reduktion diskreter Verbindungsmittel
- Verbesserung der globalen Steifigkeit bei modularer Bauweise
- Erhöhung der Rückbaubarkeit durch lösbare Vorspannsysteme
- Erhöhung der Robustheit durch mögliche Lastumlagerung

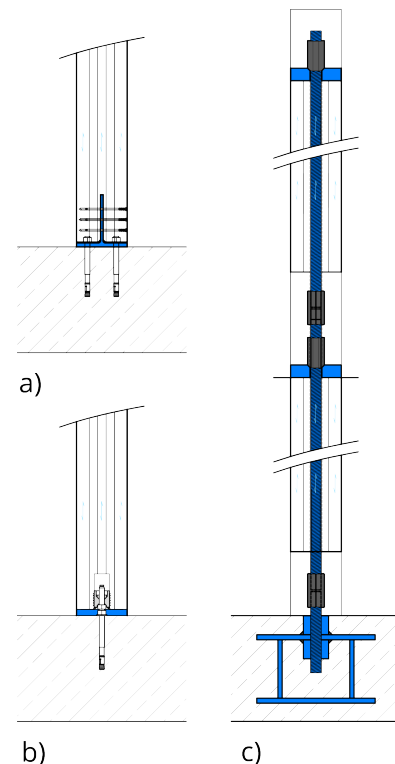


Abbildung 3.5 Zentrische Verankerungen von Brettsperrholzwänden mit
a) eingeschlitztem Blech,
b) Anker und Hülse zur Aufsetzmontage
und c) vertikaler Vorspannung

3.5.2 Referenzlösungen und Anwendungen

Im Rahmen von Sys.Wood Master-Arbeiten Recherche zu Referenzprojekten [27]

Rückbaubarer Pavillon

Der Schweizer EXPO-Pavillon 2000 („Klangkörper Schweiz“) wurde als 9 m hohe, aus überwiegend 10 × 20 cm starken Lärchen- und Föhrenbalken geschichtete Stapelkonstruktion ausgeführt. Die horizontalen Lagen waren durch Zwischenhölzer getrennt, sodass eine natürliche Belüftung und kontrollierte Austrocknung des frisch eingesetzten Holzes möglich waren. Die Wandstapel ruhten auf im Fundament eingelassenen Stahlfedern und wurden über vertikale Zugstangen mit nachspannbaren Stahlfedern kraftschlüssig zusammengepresst. Dieses System ermöglichte die Kompensation der erheblichen Schwindsetzungen des frischen Holzes und erlaubte zugleich den vollständigen Verzicht auf Nägel, Schrauben, Dübel oder Leim. Nach Ende der Ausstellung konnten die gepressten Balken sortenrein demontiert und als Konstruktionsholz weiterverwendet werden [28].



Abbildung 3.6 Vorgespannte Stapelwände des Expo-Pavillons [27]

QS-Platten

QS-Platten sind quervorgespannte, aus parallel angeordneten Brettlagen aufgebaute Massivholzbauteile, bei denen die Lamellen über hochfeste Stahlstäbe quer zur Faserrichtung kraftschlüssig zusammengepresst werden (siehe Abbildung 3.7). Die Vorspannung gewährleistet die Querkraftübertragung über Reibung, erhöht die Scheibenwirkung und sichert die Integrität des Querschnitts auch bei Feuchteänderungen.

Das System wurde in der Schweiz entwickelt und in den USA vielfach realisiert. Weitere Anwendungen sind unter anderem in Schweden dokumentiert [29]. Aufgrund der konstruktiven Ausbildung und geeigneter Materialwahl ist das System für den Einsatz im gegen Witterung geschützten Außenbereich (Nutzungsklasse 2) geeignet. Der vergleichsweise niedrige pH-Wert des Holzes ist für den verwendeten Spannstahl nicht kritisch. In anderen Anwendungsfällen kommen dennoch zusätzlich ummantelte oder korrosionsgeschützte Litzenysteme zum Einsatz.

Als Spannelemente werden hochfeste Gewindestangen bzw. Zugstabsysteme mit Europäischer Technischer Bewertung (ETA) verwendet, typischerweise mit einem Durchmesser von 20 mm und einem Achsabstand von etwa 45 cm. Die anfängliche Vorspannung liegt in der Größenordnung von $\sigma_{p,inst} = 1,0 \text{ N/mm}^2$ bezogen auf den Holzquerschnitt. Langzeituntersuchungen zeigen Spannkraftverluste infolge Relaxation, Kriechen und Holzverformung quer zur Faser von etwa 30 – 40 %. Zur Sicherstellung der Querschnittsintegrität sollte die wirksame Vorspannkraft jedoch nicht unter 40 % der initialen Vorspannung absinken.

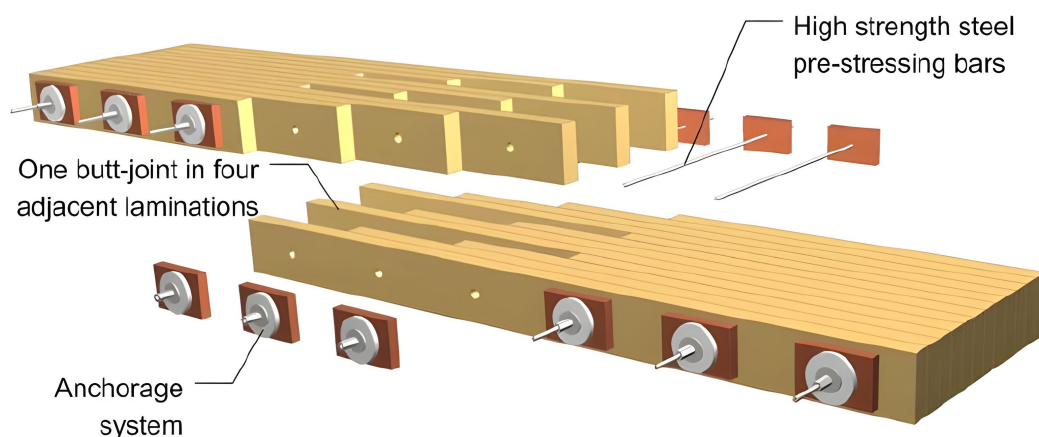


Abbildung 3.7 Komponenten einer Quer-Vorgespannten Brückenplatte (QS-Platte) [30]

Blockhausbau und Holzrahmenbau

Im Blockhausbau wurden durchgängige vertikale Stahlstangen verwendet, die mit Federn auf Druck angeschlossen wurden, um die geringe Vorspannung zu halten. Ziel war es, die Quell- und Schwindverformungen zu reduzieren.

In Österreich werden als Individuallösungen vereinzelt Stahlstäbe in Holzrahmenwänden über zwei bis drei Geschoße angeordnet, um die Robustheit des Systems zu erhöhen. In den USA wurde ein System für Holzrahmenwände entwickelt. Ein Federsystem dient dabei dem Erhalt der milden Vorspannung.

Erdbebensichere Holzbauten

Das Projekt Cathedral Hill 2 ist ein 15-geschoßiges, rund 59 m hohes Holzhochhaus in Ottawa (Kanada), dessen horizontale Aussteifung über segmentierte, vertikal vorgespannte LVL Furnierschichtholz (LVL)-Schubwände (Pres-Lam-System) erfolgt. Die Wände sind in fünf vertikale Abschnitte gegliedert und werden geschoßweise mit nachgespannten Stahlstäben ergänzt, sodass bereits während der Bauphase eine sofortige Stabilisierung erreicht und in den unteren Geschoßen höhere Vorspannkkräfte wirksam werden. Das System wurde insbesondere im Hinblick auf ein robustes und erdbebensicheres Tragverhalten konzipiert, wobei die Vorspannung ein kontrolliertes Rocking mit Rückstellwirkung ermöglicht und Schäden auf ein Minimum begrenzt [31].

Weitere Entwicklungen für hohe Seismizität wurden in den USA entwickelt.



Abbildung 3.8 Cathedral Hill [31]

Vierendeelträger

Für die Herstellung der zweifeldrigen Vierendeelträger aus Brettschichtholz mit Schubfeldern aus Brettsperrholz wurden Schubnocken in Kombination mit vertikalen Zugstäben aus hochfestem Gewindestahl (Swissgewi, M25) eingesetzt [32]. Die fünf Träger überspannen jeweils 38 m bei einer maximalen Feldspannweite von 28 m und wirken als biegesteif ausgebildete, diagonalfreie Rahmenträger. Dadurch werden große Öffnungen ermöglicht, ohne die für Fachwerke typischen Diagonalstäbe, bei gleichzeitig hoher globaler Steifigkeit und Tragfähigkeit.

3.5.3 Modellierung

Im Planungsprozess ist eine möglichst realitätsnahe Modellierung des Systems aus Wandelementen und Spanngliedern erforderlich. Guten Hintergrund gibt die wissenschaftliche Literatur [33], in denen wichtige Ansätze für das Langzeitverhalten und die Beanspruchungen durch die wirksamen Übertragungsmechanismen und zugehörigen Tragfähigkeitsnachweise beschrieben werden.

Vorspannverluste

Die Vorspannverluste vorgespannter Brettsperrholz-Elemente wurden in einer umfassenden wissenschaftlichen Untersuchung quantifiziert [33]. Nach diesem Modell zeigte sich: Erfolgt die Lastübertragung direkte von Wand zu Wand, ohne Pressung der Brettsperrholz-Decken quer zur Faser, betragen die Verluste rund 18 %. Wird die Last hingegen von durch die Brettsperrholz-Decken geleitet, steigen die Verluste durch Schwinden der Decken-Elemente quer zur Faser auf etwa 30 % an. Die zugehörigen Berechnungen basieren auf dem im Projekt angewandten Rechenmodell zur Analyse des Langzeitverhaltens vorgespannter Holzbauteile.

Reibung

Für den Reibungsbeiwert zwischen vorgespannten Holzlamellen in QS-Platten wird in EN 1995-1-2 als Bemessungswert für die Tragfähigkeit gegen Gleiten durch Überschreiten der Haftreibung in den Fugen konservativ $\mu_d = 0,17$ angegeben. In der Literatur finden sich in der Regel höhere Mittelwerte von $\mu_{mean} = 0,49$ [34] bzw. $\mu_{mean} = 0,50$ als Produktangabe der Haft-Reibungskoeffizienten von Schalldämmstreifen.

Durch planmäßig überdrückten Fugen in vorgespannten Systemen kann sichergestellt werden, dass die Reibung auch im Erdbebenfall wirksam bleibt.

Systemwirkung einer Wandscheibe

Zur Lösung des nichtlinearen Tragverhaltens der Wandscheiben unter vertikaler Vorspannung, Auflast und Horizontalkraft am Wandkopf wird das Newton-Verfahren in zwei Dimensionen angewendet [35, 36]. Die iterative Approximation der Verformung bei Druck und Biegung erfolgt dabei mittels der Jakobi-Determinante aus den Gleichgewichts- und Kompatibilitätsbeziehungen des Wandelements.

Die in Abbildung 3.9 dargestellten Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für eine aussteifende Wand mit Zugankern und zusätzlich unterschiedlichen Vorspanngraden zeigen, dass vertikal vorgespannte Tragwerke aus Brettsper Holz ein höheres Steifigkeitsverhalten und erhöhte Traglast gegenüber konventionell mittels Stahlblechformteilen verbundenen Tragwerkselementen aufweisen.

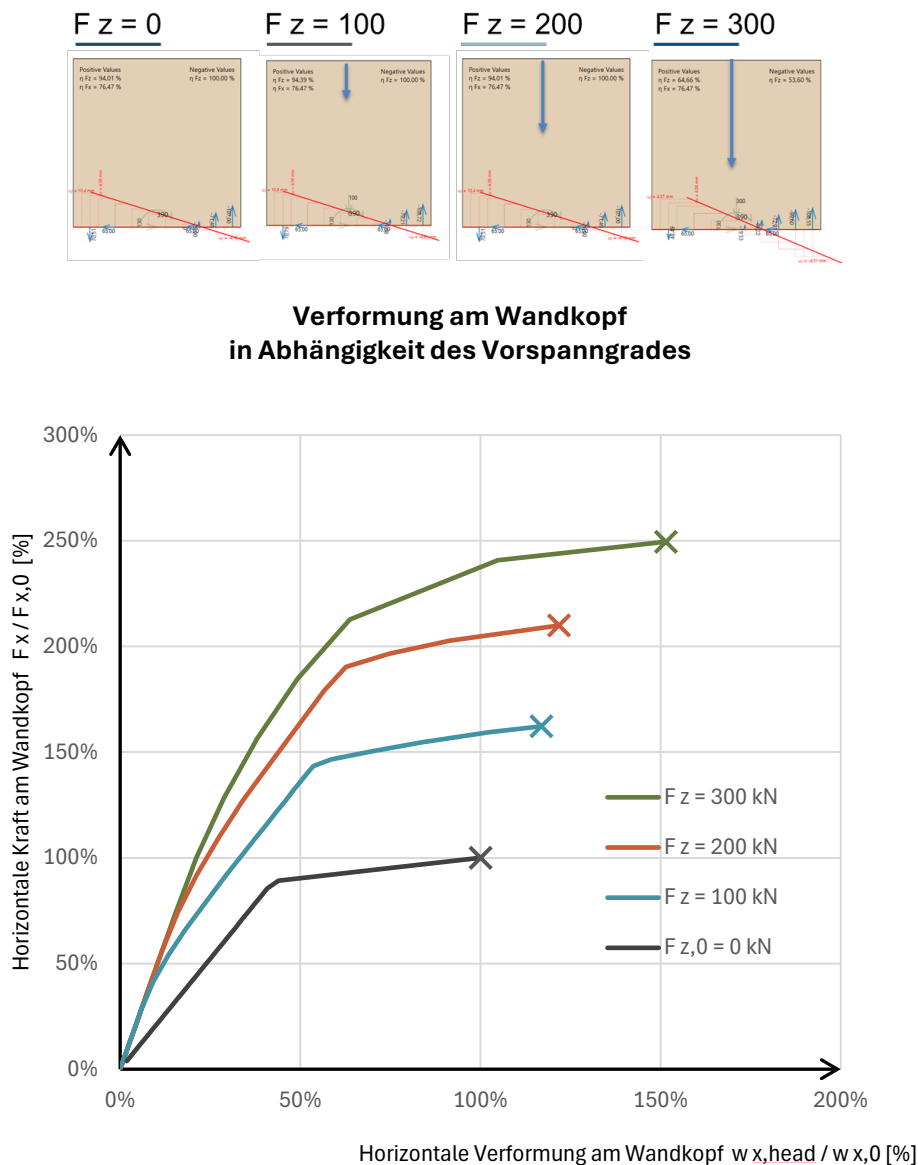


Abbildung 3.9 Steifigkeit und Traglast bei unterschiedlichen Druckniveaus

FE-basierte Modellierung

Die statische Modellierung von vorgespannten BSP- Wände mithilfe einer FE-Software wurde im Zuge einer weiteren Sys.Wood-Masterarbeit untersucht [37]. In der Arbeit wurden folgende Empfehlungen erarbeitet:

Im ersten Schritt müssen die benötigten Vorspannkraften ermittelt werden. Diese können mit Hilfe einer Finite-Elemente-Methode (FEM)-Software berechnet werden. Dafür wird ein 2D- oder 3D-FE-Modell erstellt, horizontale und vertikale Lasten eingegeben und die Zugkräfte (zufolge Kippen) ermittelt. Diese können an

Auflagerreaktionen bzw. Resultierenden von Liniengelenken abgelesen werden. Für die Abbildung der vertikalen Vorspannung innerhalb einer FE-Software gibt es im Gegensatz zum Spannbetonbau noch keine expliziten Tools. Eine Herangehensweise ist die Abbildung der Vorspannkraft durch eine äquivalente Stablängsverkürzung. Diese kann mittels einer Umrechnung mithilfe des Hook'schen Gesetzes ermittelt werden.

In ein zwei- oder dreidimensionales Flächenmodell können nun die Stabspannglieder als Zugstäbe mit Stahlquerschnitt in Wandebene eingefügt und die Stablängsverkürzung als Lastfall aufgebracht werden. Des Weiteren kann die Verankerungsplatte durch einen Starrstab abgebildet werden. Die Verzahnung bzw. die ebene Fuge inkl. Ansetzen eines Reibwiderstandes kann durch die Steuerung von Ersatzfedersteifigkeiten und Gelenkseigenschaften von Liniengelenken modelliert werden.

3.5.4 Konstruktion

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden Varianten für eine wirtschaftliche und Holzbaugerechte konstruktive Umsetzung der beschriebenen Vorspannsysteme erarbeitet [38].

3.5.5 Versuche

Die Verifikation, der den Berechnungen zugrunde gelegten Annahmen, soll im Rahmen von Orientierungsversuchen erfolgen. Diese Versuche dienen als Proof-of-Concept und bilden die Grundlage für weiterführende experimentelle und analytische Untersuchungen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden Versuche in zwei Maßstäben durchgeführt:

Kleinversuche

Das Ziel des Konzepts der Vorspannsysteme ist die Reduktion der benötigten Verbindungsmittel auf ein Minimum. Die Übertragung der Scherkräfte kann anstelle eigener Verbindungsmittel (z.B. Schubwinkeln mit hoher Anzahl von Rillennägeln) durch Reibungskräfte zwischen den Wandelementen erfolgen. Um die Leistungsfähigkeit dieses Konzepts zu definieren, werden Reibbeiwerte für BSP benötigt. Die Werte aus der Literatur geben in Abhängigkeit der Faserrichtung, Holzfeuchte und Oberflächenbeschaffenheit eine Bandbreite von 0,2 bis 0,6 an [39, 40]. Aus diesem Grund werden Versuche mit verschiedenen Variationen an 15 cm großen BSP-Würfeln durchgeführt.

Ziel sind verifizierte Reibbeiwerte für die Paarung Brettsper Holz – Brettsper Holz bei unterschiedlichen Druckspannungen in der Fuge.

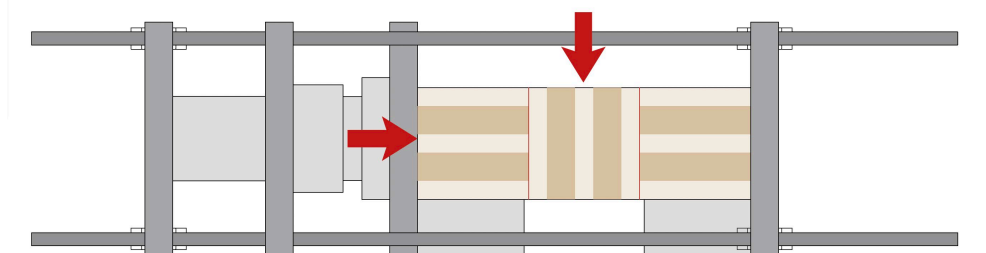


Abbildung 3.10 Versuchsaufbau zur Bestimmung von Reibbeiwerten für BSP

Großversuche

Im Maßstab 1:1 soll die prinzipielle Machbarkeit des Systems nachgewiesen sowie das Schubtragverhalten der vorgespannten Fugen untersucht werden. Der Versuch soll die Situation von zwei geschoßhohen Wandelementen abbilden, die über Vorspannelemente kraftschlüssig gekoppelt wurden. Die Belastung der Aussteifenden Wände ist eine Horizontalkraft am Wandkopf. Auf Grund der geometrischen Randbedingungen der Prüfeinrichtung wurde der Versuch liegend konzipiert. Die Lastaufbringung sowie die Lagerungsbedingungen an den Wandenden sind so gewählt, dass das maßgebende Schub- und Verformungsverhalten der Fuge realitätsnah erfasst werden kann, wie in Abbildung 3.11 dargestellt. Durch die horizontale Anordnung sind seitliche Halterungen gegen Kippen erforderlich.

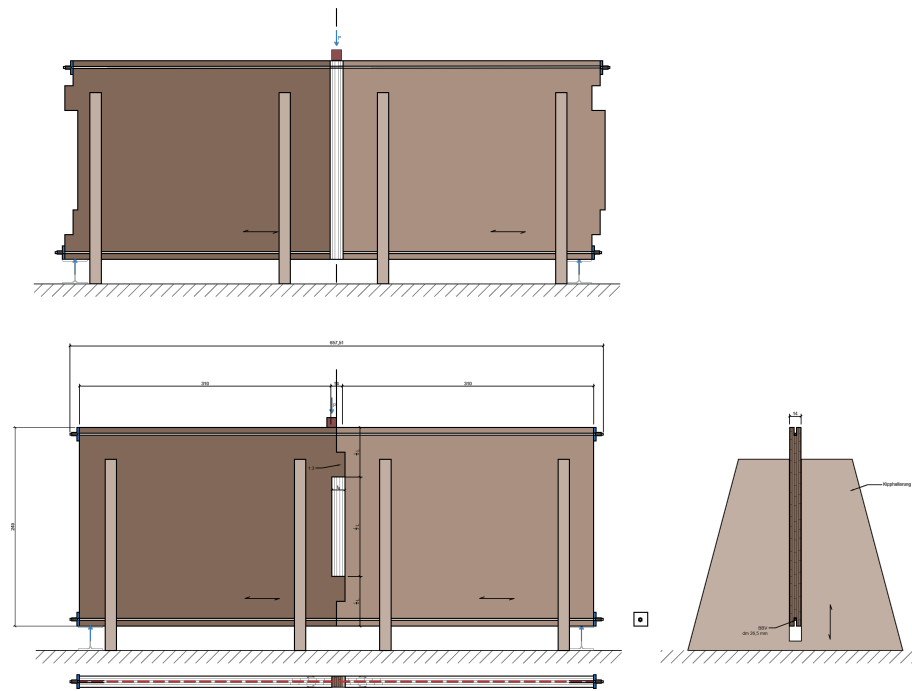


Abbildung 3.11 In die Horizontal gedrehte Wandelemente für den Großversuch zum Vorspannsystem. Variante 1 (oben) mit glatter Fuge, Variante 2 (unten) mit Verzahnter Fuge zur Schubübertragung und Deckenlagerung

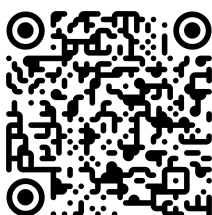
Die Versuche werden in Kooperation mit verschiedenen Höheren Technischen Lehranstalten durchgeführt. An dieser Stelle ein Dankeschön an die beteiligten Partner für die Unterstützung und gute Zusammenarbeit: HTBLVA Graz-Ortweinschule, Dr.techn. Hannes Ebner, Camillo Sitte Bautechnikum, Dr.techn. Christoph Hackspiel, HTL Mödling, Dr.techn. Michael Palka, Dipl.-Päd. Rainer Winkler.

3.5.6 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Das Forschungsprojekt hat sich nicht nur mit der theoretischen Frage zur Machbarkeit kreislauffähiger Verbindungen befasst, sondern die Bandbreite an Möglichkeiten aufgezeigt. Zerlegbare Fügungen sind das zentrale Thema für die Wiederverwendung von Bauteilen und damit die langfristige Bindung von Treibhausgasen in der gebauten Umwelt.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zeigen, was bereits gut funktioniert und wo noch Forschungsbedarf besteht. Zwar steht bereits eine breite Auswahl kreislauffähiger Produktlösungen bereit, doch sind diese oftmals komplexer und damit teurer im Vergleich zu traditionellen Fügungen. Es besteht deutlicher Bedarf an einfachen, kostengünstigen Lösungen. Aus technischer Sicht führt insbesondere der verbreitete Ansatz der Fügung durch lange Vollgewindeschrauben zu Problemen hinsichtlich der Lösbarkeit und erfordert neue Strategien. Ebenso ist der Umgang mit duktilen Reserven hinsichtlich kreislauffähiger Verbindungen weiterer Forschungsgegenstand.

Vorgespannte Wandelemente weisen Vorteile in der Brandbeständigkeit auf, sind für die Vermeidung von Schallbrücken als günstig anzusehen, erlauben den Ansatz planmäßiger Reibung zur Übertragung von Horizontallasten und sind als zerstörungsfrei zerlegbare Konstruktionen anzusehen. Vorgespannte Systeme weisen im Erdbebenfall hohes Trag- und Duktilitätsverhalten. Mit Ansatz des nichtlinearen Tragverhaltens können Pushover-Berechnung nach der zweiten Generation der Eurocodes durchgeführt werden, um das Systemverhalten optimal zu nutzen.



Alireza Fadai, Alexander Gerger, Jasmin Prünner, Markus Wallner-Novak: Sys.Wood: Vertikal Vorgespannte Wandelemente. Hintergrunddokumentation.

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_vorspannung

4 Lebenszyklusanalyse

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Vorfertigung im Holzbau unter dem Aspekt der Lebenszyklusanalyse betrachtet. Der Fokus wurde auf die Einordnung in das normative Bewertungssystem gelegt.

Die vorangegangenen Kapitel haben konstruktive Strategien zur Verlängerung der Nutzungsdauer (Repair) sowie zur Förderung der Wiederverwendung (Reuse) behandelt. Kapitel 4 ordnet diese Ansätze in das normative System der Gebäudeökobilanzierung nach EN 15978 ein und untersucht, inwieweit Vorfertigung und kreislauffähige Detailausbildungen bilanziell wirksam werden. Der Einfluss der Vorfertigung betrifft dabei insbesondere die Module A3 (Herstellung) und A5 (Errichtung), da durch die Verlagerung von Arbeitsschritten in die Werkfertigung eine Verschiebung der Emissionsanteile innerhalb der Herstellungs- und Bauphase erfolgt.

In diesem Zusammenhang wird zwischen der quantitativen Lebenszyklusanalyse und ergänzenden qualitativen Bewertungsansätzen zur Kreislauffähigkeit unterschieden.

Die Systematik der Gebäudeökobilanz nach EN 15978 ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Sie gliedert den Lebenszyklus eines Bauwerks in die Module A (Herstellung und Errichtung), B (Nutzung), C (End-of-Life) sowie D (Potenziale außerhalb der Systemgrenze) und bildet damit die methodische Grundlage für eine normkonforme Bewertung¹.

Während die Ökobilanzierung nach EN 15978 quantitative Umweltwirkungen über definierte Lebenszyklusmodule abbildet, erfassen Leitfäden zur Kreislauffähigkeit konstruktive und organisatorische Eigenschaften, welche die Ausprägung einzelner Module – insbesondere B4 (Austausch), C (Rückbau und Entsorgung) sowie D (Wiederverwendungs- und Recyclingpotenziale) – maßgeblich beeinflussen.

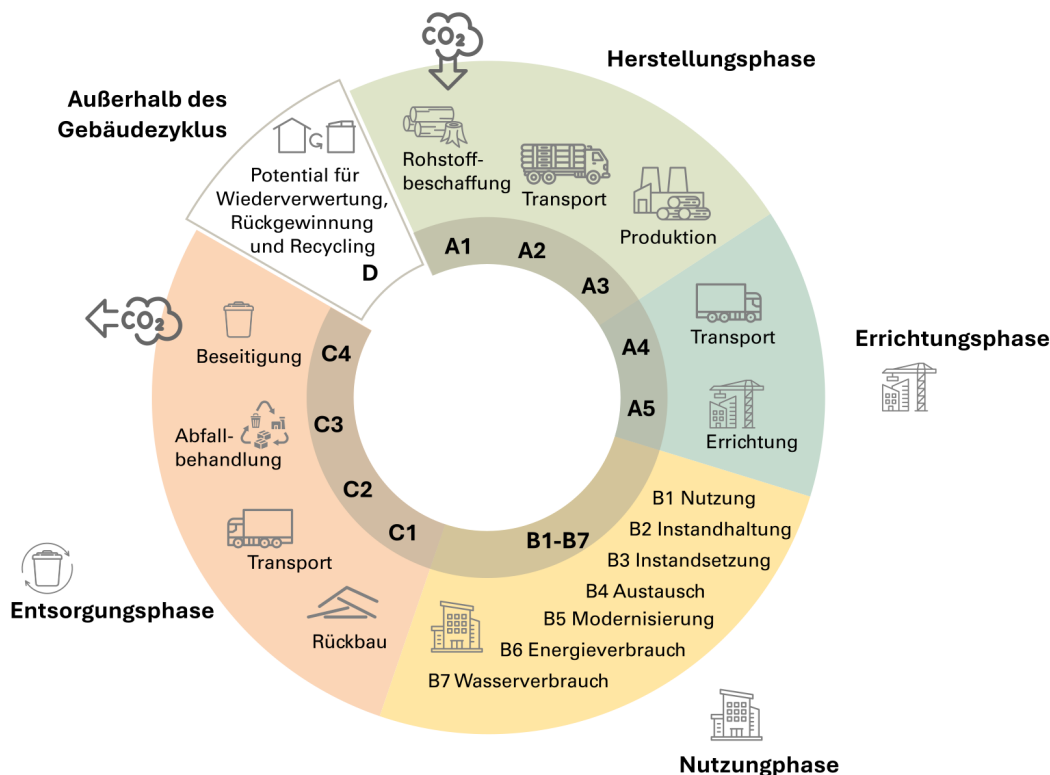


Abbildung 4.1 Systematik der Gebäudeökobilanz nach EN 15978 mit Darstellung der Lebenszyklusmodule A–D.

¹ Im Zuge der laufenden Revision der Norm wird eine Erweiterung der Modulstruktur diskutiert. Diese sieht ein zusätzliches Modul in der Nutzung B8 für zusätzliche Nutzungsaufwände vor. Außerdem eine Unterteilung des Modul D in D1 für Wiederverwendung und D2 für Energierückgewinnung. Ziel dieser Differenzierung ist eine präzisere Abbildung von Wiederverwendungsstrategien und Kreislaufpotenzialen. Die dargestellte Struktur ist bislang nicht normativ verbindlich.

4.1 Bewertungssysteme

Die ökologische Bewertung von Gebäuden kann unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen.

Lebenszyklusanalysen

Einerseits steht die quantitative Ermittlung von Umweltwirkungen im Vordergrund, wie sie im Rahmen normativer Lebenszyklusanalysen (Life cycle assessment LCA) erfolgt. Mit der Einführung der OIB-Richtlinie 7 sowie der Umsetzung der europäischen Gebäuderichtlinie [41] wird die Berechnung von Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus schrittweise zu einer verbindlichen Anforderung im Neubau. Künftig ist insbesondere die quantitative Ermittlung des Global Warming Potential (GWP) auf Grundlage der EN 15978 vorgesehen, wobei zunächst die Herstellungsphase (Module A1–A3) im Fokus steht.

Im Rahmen dieser Bewertung ist zwischen fossilen Treibhausgasemissionen und biogenem Kohlenstoff zu unterscheiden. Während fossile Emissionen dauerhaft zur Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration beitragen, wird biogener Kohlenstoff im nachwachsenden Rohstoff Holz während des Wachstums gebunden und über die Nutzungsdauer im Produkt gespeichert. Die bilanzielle Behandlung dieser biogenen Kohlenstoffspeicherung sowie deren allfällige Freisetzung am Lebensende erfolgt normiert nach EN 15804 und ist für die Interpretation der Ergebnisse im Holzbau von zentraler Bedeutung.

Leitfäden zur Bewertung der Kreislaufrfähigkeit

Andererseits gewinnen qualitative und semiquantitative Bewertungsansätze an Bedeutung, welche konstruktive Eigenschaften im Hinblick auf Kreislaufrfähigkeit, Demontierbarkeit und Wiederverwendungspotenzial systematisch erfassen.

Im Projekt Sys.Wood werden beide Ebenen miteinander verknüpft. Während die Gebäudeökobilanz nach EN 15978 eine normierte, wirkungsbezogene Bilanzierung über definierte Lebenszyklusmodule ermöglicht, adressieren ergänzende Leitfäden die konstruktive Ausgestaltung von Bauteilen und deren Einfluss auf Austauschzyklen (Modul B4), Rückbau (Modul C) sowie Potenziale außerhalb der Systemgrenze (Modul D).

4.2 Der Einfluss der Vorfertigung auf die Ökobilanz

Im Projekt Sys.Wood wurde unter dem Begriff *Assessment* eine Erhebung der ökologischen Aufwände von vorgefertigten Holzbauteilen durchgeführt. Ziel war die Einordnung der Vorfertigung in das Modulsystem der Gebäudeökobilanz innerhalb des normativen Rahmens von EN 15804 und EN 15978, insbesondere in Bezug auf das Modul A3 (Herstellung). Dabei wurde untersucht, in welchem Umfang werkseitige Produktionsprozesse bilanziell wirksam werden und wie sich diese innerhalb der Herstellungs- und Bauphase verorten lassen.

Der Untersuchungsrahmen beschränkte sich auf ausgewählte Bauteile der beteiligten Partnerunternehmen und eines Ausführenden Unternehmens des Planungsbüros RWT. Es handelte sich um eine exemplarische Bewertung realer Produktionsbedingungen.

Die ökobilanzielle Analyse erfolgte zweistufig.

Im ersten Schritt wurde eine Stoffbilanz der untersuchten Bauteile erstellt. Grundlage bildeten etablierte Bauteildatenbanken, insbesondere ÖKOBAUDAT. Bewertet wurde das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) der eingesetzten Materialien bezogen auf die funktionelle Einheit in kg CO₂-Äqu./m².

Im zweiten Schritt wurden die Produktionsschritte der Vorfertigung systematisch erfasst. Hierzu wurden die werkseitigen Energieaufwendungen für Heizen, Stromverbrauch der Maschinen sowie infrastrukturelle Aufwände dokumentiert und auf die jeweilige Produktionsmenge umgelegt. Auf dieser Basis konnten durchschnittliche Emissionswerte der Vorfertigung pro m² Bauteil ermittelt und den materialbezogenen Emissionen gegenübergestellt werden.

4.2.1 Stoffbilanz der Bauteile

Die materialbezogenen Emissionen der untersuchten Bauteile wurden auf Grundlage etablierter Bauteildatenbanken ermittelt, insbesondere unter Verwendung der ÖKOBAUDAT sowie produktspezifischer Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declarations, EPDs). Für die einzelnen Schichten der Bauteilaufbauten wurden die entsprechenden Datensätze herangezogen und auf die definierte funktionelle Einheit bezogen.

Bewertet wurde das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) der eingesetzten Baustoffe in kg CO₂-Äqu. pro m² Bauteil. Die Berechnung erfolgte gemäß den Vorgaben der EN 15804 und bildet die Grundlage für die anschließende Gegenüberstellung mit den prozessbedingten Emissionen der Vorfertigung.

4.2.2 Prozessanalyse der Vorfertigung

Parallel zur Stoffbilanz wurden die Produktionsschritte in der Vorfertigung systematisch erfasst. Ziel war die Quantifizierung der energiebedingten Emissionen der Werkstätten, insbesondere für Stromverbrauch der Maschinen, Heizung, sowie infrastrukturelle Aufwände.

Die Erhebungen in der Produktion vorgefertigter Holzbauwände der beiden Wirtschaftspartner *Strobl Holzbau* und *O.K. Energiehaus* wurde im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten durchgeführt [42, 43]. Dabei wurden die einzelnen Produktionsschritte dokumentiert sowie Verbindungsmittel und Maschinenzeiten erfasst.

Eine prozessbezogene Zuordnung der energiebedingten Emissionen in den Betrieben war nicht möglich. Daher wurde ein praxisnaher Ansatz gewählt:

- Erfassung der jährlichen Energieaufwendungen der Betriebe
- Umlegung auf die Produktionsmenge
- Ableitung von durchschnittlichen Emissionswerten pro m² Bauteil

Als Referenz für die Bewertung der Energieemissionen wurde der österreichische Strom- und Energiemix angesetzt, um Vergleichbarkeit zwischen Betrieben herzustellen.

Auf Grundlage dieser Methode wurden weitere vorgefertigte Wandelemente anhand von Produktionsdaten eines dritten ausführenden Betriebes des Wirtschaftspartners RWT bewertet. Die Ergebnisse wurden durch den Vergleich mit vergleichbaren Untersuchungen in Deutschland plausibilisiert.

In der [Hintergrunddokumentation „Ökologische Bewertung“](#) sind die Ergebnisse im Einzelnen zusammengefasst.

4.2.3 Quantitative Ergebnisse

Höhe der Emissionen aus der Vorfertigung

Die Analyse zeigt, dass die Treibhausgasemissionen aus der Vorfertigung vergleichsweise gering sind: Für eine typische Außenwand betragen die Emissionen aus der Vorfertigung etwa 2,5–3,0 kg CO₂-Äqu./m².

Dieser Wert steht einer CO₂-Äqu.-Bindung im Holz von rund 75 kg CO₂-Äqu./m² gegenüber.

Die Ergebnisse liegen im gleichen Größenbereich wie eine vergleichbare Studie aus Deutschland [44] und bestätigen die geringe ökologische Relevanz der Vorfertigung im Verhältnis zur Materialbilanz.

Einordnung im Gesamt-GWP des Bauteils

Bezogen auf das gesamte Treibhauspotenzial eines Wandbauteils reduziert bzw. erhöht die Vorfertigung das GWP lediglich um rund 2 – 3 %. Diese relative Betrachtung erweist sich jedoch als nur eingeschränkt aussagekräftig, da die materialbezogene Sachbilanz je nach Bauteilaufbau stark variiert und die Emissionen der Vorfertigung weitgehend unabhängig vom Materialmix sind. Die Angabe eines absoluten Betrages ist daher sinnvoller als ein Verhältniswert.

Automatisierungsgrad

Ein belastbarer Vergleich der Emissionen in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad der Vorfertigung konnte nicht durchgeführt werden. Die vorhandene Datenlage war hierfür zu wenig differenziert, insbesondere hinsichtlich der Zuordnung einzelner Prozessschritte zu spezifischen Energieverbräuchen der einzelnen Maschinen.

Für den österreichischen Standard kann jedoch – ohne detaillierte Prozesskenntnisse – ein **pauschaler Richtwert von etwa 3,0 kg CO₂-Äqu./m²** für die Vorfertigung angesetzt werden.

4.2.4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass die ökologischen Aufwände der Vorfertigung im Holzbau relativ gering sind und im Rahmen von normkonformen Gebäudeökobilanzen zu berücksichtigenden sind. Diese Einordnung wird durch bestehende Gebäude-LCA-Studien bestätigt [45].

Die Vorteile der Vorfertigung liegen weniger in einer unmittelbaren Reduktion einzelner Bauteilemissionen, sondern in systemischen Effekten entlang der Wertschöpfungskette. Dazu zählen eine präzisere Materialplanung, reduzierte Materialverluste sowie verbesserte Prozessqualität unter kontrollierten Produktionsbedingungen. Ein hoher Vorfertigungsgrad führt zudem zu einer Entlastung der Baustelle. Die Reduktion vor Ort ausgeführter Arbeitsvorgänge verringert Energieeinsatz und temporäre Emissionen, sodass die Errichtungsphase (Modul A5) im Holzbau insgesamt von untergeordneter Bedeutung bleibt.

Die Vorfertigung bewirkt eine Verschiebung von Aufwänden aus Modul A5 in Modul A3, ohne das Gesamt-GWP zu erhöhen, da die entsprechenden Prozesse innerhalb der bilanzierten Systemgrenze stattfinden.

Weiters ist anzumerken, dass durch die Vorfertigung auch günstige Bedingungen für Wiederverwendung geschaffen werden, da auf der Baustelle hergestellte Verbindungen vorgefertigter Bauteile auch ihre Trennbarkeit erhöht, wie Untersuchungen von Fertigteilhäusern zeigen [46, 47].

Methodische Unterschiede in der Behandlung biogenen Kohlenstoffs beeinflussen die Darstellung einzelner Ergebnisse, ändern jedoch nichts an der grundsätzlichen Einordnung der Vorfertigung als ökologisch nicht dominanter Einflussfaktor innerhalb der Herstellungs- und Bauphase.



Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Vorfertigung im Holzbau zu einer Reduktion der ökologisch relevanten Baustellenprozesse führt und Aufwände aus der Bauphase (A5) in vorgelagerte, kontrollierte Produktionsprozesse (A3) verlagert, ohne das Gesamt-Treibhauspotenzial zu erhöhen. Vor diesem Hintergrund stellt die Vorfertigung einen zentralen Hebel für Ressourceneffizienz, Prozessqualität und Kreislauffähigkeit dar und kann als ökologisch robuste und prozesssichere Bauweise eingeordnet werden.

4.3 Leitfäden zur Kreislauffähigkeitsbewertung

Die Bewertung der Kreislauffähigkeit von Baukonstruktionen kann auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen erfolgen. Abbildung 4.2 zeigt diese Ebenen exemplarisch am Aufbau einer Außenwand. Unterschieden wird zwischen

- Materialebene (M),
- Komponentenebene (K),
- Bauelementebene (BE),
- Bauteilebene (BT) sowie
- Gebäudeebene (G).

Jede dieser Ebenen adressiert spezifische Anforderungen an Trennbarkeit, Demontierbarkeit und Nutzungsflexibilität.

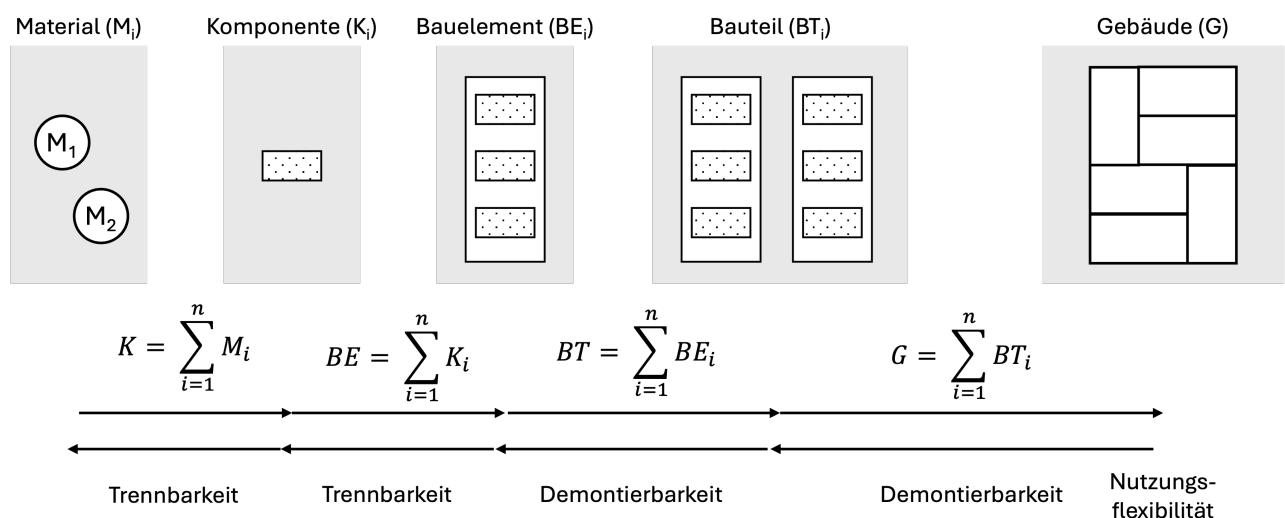


Abbildung 4.2 Darstellung der unterschiedlichen Betrachtungsebenen der Kreislauffähigkeit nach [33]

Auf der Materialebene steht die stoffliche Trennbarkeit im Vordergrund, insbesondere im Hinblick auf sortenreine Rückgewinnung oder stoffliche Verwertung. Auf Komponenten- und Bauelementebene ist die lösbare Verbindungstechnik maßgeblich, da sie den Grad der Schädigung beim Rückbau bestimmt. Auf Bauteilebene wird die Demontierbarkeit ganzer Konstruktionseinheiten relevant, während auf Gebäudeebene die strukturelle Anpassungsfähigkeit und Nutzungsflexibilität im Vordergrund stehen. Unabhängig von der gewählten Betrachtungsebene lassen sich drei zentrale Bewertungsdimensionen identifizieren:

- **Trennbarkeit** der eingesetzten Materialien und Schichten,
- **Demontierbarkeit** der Fügungen und Bauteilverbindungen,
- **Nutzungsflexibilität** im Sinne einer funktionalen Anpassungsfähigkeit des Gebäudes.

Diese konstruktiven Eigenschaften beeinflussen unmittelbar die Lebenszyklusmodule der normativen Gebäudeökobilanz. Insbesondere sind sie relevant für Modul B4 (Austausch), Modul C (Rückbau und Abfallbehandlung) sowie Modul D (Wiederverwendungs- und Recyclingpotenziale). Die Kreislauffähigkeitsbewertung stellt somit eine konstruktive Ergänzung zur quantitativen Lebenszyklusanalyse dar, indem sie jene Parameter systematisiert, welche die Ausprägung dieser Module maßgeblich bestimmen. Für die Bilanzierung des Moduls B4 (Austausch) sind neben der konstruktiven Ausgestaltung der Fügungen auch belastbare Annahmen zur Lebensdauer einzelner Materialien und Komponenten erforderlich. Ebenso setzt die Bewertung des Recycling- und Wiederverwendungspotenzials in Modul D detaillierte Kenntnisse über die Trennbarkeit, den Schädigungsgrad beim Rückbau sowie die stoffliche oder funktionale Weiterverwendbarkeit voraus. Da diese Parameter in der normativen Gebäudeökobilanz nicht explizit geregelt sind, wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Leitfäden zur Bewertung der Kreislauffähigkeit entwickelt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich Bewertungslogik, Betrachtungsebene und Zielrichtung. Ziel des Forschungsprojekts war es daher, die Vergleichbarkeit dieser Ansätze zu untersuchen und deren Anwendbarkeit auf die entwickelten Leit-Details zu prüfen. Die Ergebnisse zeigen unterschiedliche Bewertungslogiken auf und verdeutlichen zugleich das Potenzial für eine künftige methodische Harmonisierung.

4.3.1 Leitfäden zur Kreislauffähigkeitsbewertung

In Phase 1 erfolgte eine Recherche über mögliche Bewertungsleitfäden. Hierfür wurden drei Leitfäden/Systeme miteinander verglichen: ZiFa 1.0 [48], der Katalog kreislauffähiger Holzbauteile [49] sowie der Leitfaden „Rückbauorientiertes Planen und Bauen im Holzbau [50]. Die ausgewählten Bewertungssysteme legen den Fokus auf verschiedene Zielgruppen (z.B.: Handwerker, Planer) und Themengebiete. Die Schwerpunkte reichen von der Demontierbarkeit des Verbindungstyps der jeweiligen Schichten, über den Schädigungsgrad der Schichten durch Demontage bis hin zum Zirkularitätspotenzial durch etwa Wiederverwendung oder Recycling.

4.3.2 Ergebnisse

Durch die Analyse konnten die Unterschiede (Umfangs, Betrachtungsebene) sowie Gemeinsamkeiten der Systeme aufgezeigt werden (siehe Abbildung 4.3). Hinter unterschiedlichen Begriffen konnten gemeinsame Begriffsinhalte identifiziert werden. Beispielsweise thematisieren die in den Leitfäden verwendeten Begriffe Rückbaupotenzial, Rückbaubarkeit und Demontierbarkeit alle den Grad der Schädigung auf Bauteil- bzw. Komponentenebene. Nachdem die Begriffsinhalte nun vergleichbar waren, erfolgte im nächsten Schritt die Betrachtung der jeweiligen Bewertungsskalen.

Die Leitfäden weisen unterschiedliche Bewertungsskalen von 3-stufig (Farbcode), über 4-stufig (Punkte) bis zu 7-stufig (Arten). Anschließend wurden die jeweiligen Skalen normiert und zur Vergleichbarkeit als Prozent zwischen 0 % –100 % interpretiert. Die Anwendbarkeit dieses Systems wurde im Rahmen eines Workshops mit den Projektpartner:innen getestet. Die zur Bewertung erforderlichen Kriterien konnten eingegrenzt werden auf:

- Art der Fügung
- Grad der Schädigung
- Grad der Verunreinigung
- Anteil an Wieder-/ Weiterverwendung

Nähere Informationen zu den Bewertungsleitfäden sowie Anwendungsbeispiele anhand der Sys.Wood-Aufbauten sind im [Hintergrunddokument Ökologische Bewertung](#) beschrieben.

		Kreislffg. Holzbauteile Dolezal 		ZiFa 1.0 Kromoser 		LF Rückbau Koppelhuber 	
		Zirkularitäts- potenzial (Art) (1-7) ³	Rückbau- potenzial (1-4) (0-100 Pkt.)	Rückbaubarkeit (0-100%) ¹	Wiederver- wendbarkeit (Menge) (0-100%) ²	Demontier- barkeit (1-3)	Trennbarkeit (1-3)
Bauteile	Grad der Schädigung						
	Grad der Verunreinigung						
Komponente	Grad der Schädigung						
	Grad der Verunreinigung						
Material	End-of-Life-Kriterien						
	Anteil an Wiederverwendung						

Abbildung 4.3 Matrix der betrachteten Leitfäden zur Bewertung der Zirkularität [48, 49, 50]

4.4 Ökologische Bewertung von Wiederverwendeten Bauteilen

Im Rahmen des Forschungsprojektes Sys.Wood wurden Inhalte aus verschiedenen Perspektiven analysiert. Beispielsweise wurden die Leitdetails aus praktischer und technischer Sicht entwickelt. Anschließend wurden vier Außenwandaufbauten aus Sicht der ökologischen Bewertung näher untersucht. Dieser Abschnitt widmet sich der LCA-Bewertung dieser Aufbauten.

4.4.1 Herangehensweise

Zur ökologischen Bewertung der Sys.Wood Bauteile, wurden die Aufbauten mittels einer LCA beurteilt. Kennwerte der Materialien wurden anhand von environmental product declarations (EPD) aus der online-Datenbank „ÖKOBAUDAT“ den jeweiligen Bauteilschichten zugeordnet [51]. Hierfür wurden vorrangig generische Datensätze verwendet. Bauteillebensdauern wurden anhand der Kennwerte des BKI (Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern) bestimmt [52]. Die Auswertung erfolgt für GWP_{total} , GWP_{biogen} und GWP_{fossil} . Zur einfachen Veranschaulichung werden nachfolgend nur das GWP_{total} der Module A1-A3, B4 und C3-C4 für $1m^2$ (funktionelle Einheit) des jeweiligen Bauteilaufbaus ausgewertet. Eine detaillierte Auswertung ist im [Hintergrunddokument Ökologische Bewertung](#) ersichtlich.

Für die Bilanzierung wurde ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren angesetzt. Bauteilschichten, die über eine geringere Lebensdauer verfügen, müssen in diesem Zeitraum ausgewechselt werden und sind im Modul B4 erfasst. Sollten mehrere Schichten untrennbar mit einer defekten Bauteilschicht verbunden sein oder für die Auswechslung der defekten Bauteilschicht zerstört werden müssen, werden diese ebenfalls im Modul B4 erfasst. Die Lebensdauer des Bauteils kann daher maßgeblich von der Beständigkeit und Zugänglichkeit des „schwächsten Glieds“ im Verbund beeinflusst werden.

Um berechnete Daten einordnen zu können, wurden äquivalente Bauteile (Tragfähigkeit, U-Wert) in Stahlbeton-Bauweise aus der Bauteildatenbank Baubook herangezogen [53]. Dabei ist zu beachten, dass LCA-Bilanzierungen für gesamte Gebäude durchgeführt werden. Damit fließen auch bauweisenspezifische Einflüsse wie etwa die Spannweiten oder Brandschutzanforderungen indirekt in die Bewertung ein. Im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgt die Auswertung vereinfacht bauteilbezogen, weshalb diese Informationen nicht mitberücksichtigt wurden.

4.4.2 Vergleich der Außenwand Holz zu Beton

Beim Vergleich der Holzbauwände zu ihren U-Wert äquivalenten Stahlbetonbauteilen fällt auf, dass es der kumulative Impact (Module A1-A3, B4, C3-C4) der Stahlbetonvarianten höher ausfällt als der der Holzbauteile. Im Durchschnitt verfügen die Holzbauwände über ca. 65 % des GWP_{total} einer Stahlbetonaußenwand. Betrachtet man dies auf Ebene der einzelnen Module, lässt sich festhalten, dass bereits in der Herstellungsphase (A1-A3) die Betonbauteile einen wesentlich höheren GWP_{total} als die Holzbauteile aufweisen. Auch wenn das im Holz gebundene CO_2 -Äqu. im Modul C3 wieder frei wird, fällt der GWP_{total} der Holzbauteile in Summe geringer aus. Durch reine Betrachtung der Herstellungsphase (A1-A3) gehen Informationen über die Produktlebensdauer verloren. Erst eine Betrachtung von Herstellung bis End-of-Life lässt seriöse Vergleiche zwischen organischen und mineralischen Bauweisen zu.

Schlussfolgerungen für die Optimierung der Außenwände

Eine wesentliche Stellschraube für die ökologische Optimierung der Holzbauteile, stellen die Dämmebenen aus Mineralwolle dar. Bei der AW 1.1.b HM-HILÜ stellt diese etwa 25 % des Gesamtimpacts (A1-A3, B4, C3, C4) dar. Sie ist aufgrund ihrer anorganischen Materialeigenschaft jedoch dauerhafter als Holzfasern oder Zellulose, welche innerhalb eines Gebäudezyklus erneuert werden müssten. Dies betrifft beispielsweise die Zellulose-Einblasdämmung der AW 1.3.a HM-HILÜ. Ein Austausch ist ohne das Entfernen von vorgeschalteten Bauteilschichten jedoch nicht möglich, weshalb diese frühzeitig entfernt werden müssen. Da diese nicht zerstörungsfrei rückgebaut werden können, die ökologischen Vorteile der Zellulose Einblasdämmung nicht vollständig genutzt werden. Bei den STB-Referenzen (STB-20) stellen EPS mit ~40 % und der Stahlbeton ~48 % den größten Impact dar. Soweit man die Tragschicht nicht abändert, wäre hier eine Adaption des WDVS-Systems durch den Austausch des EPS am sinnvollsten.

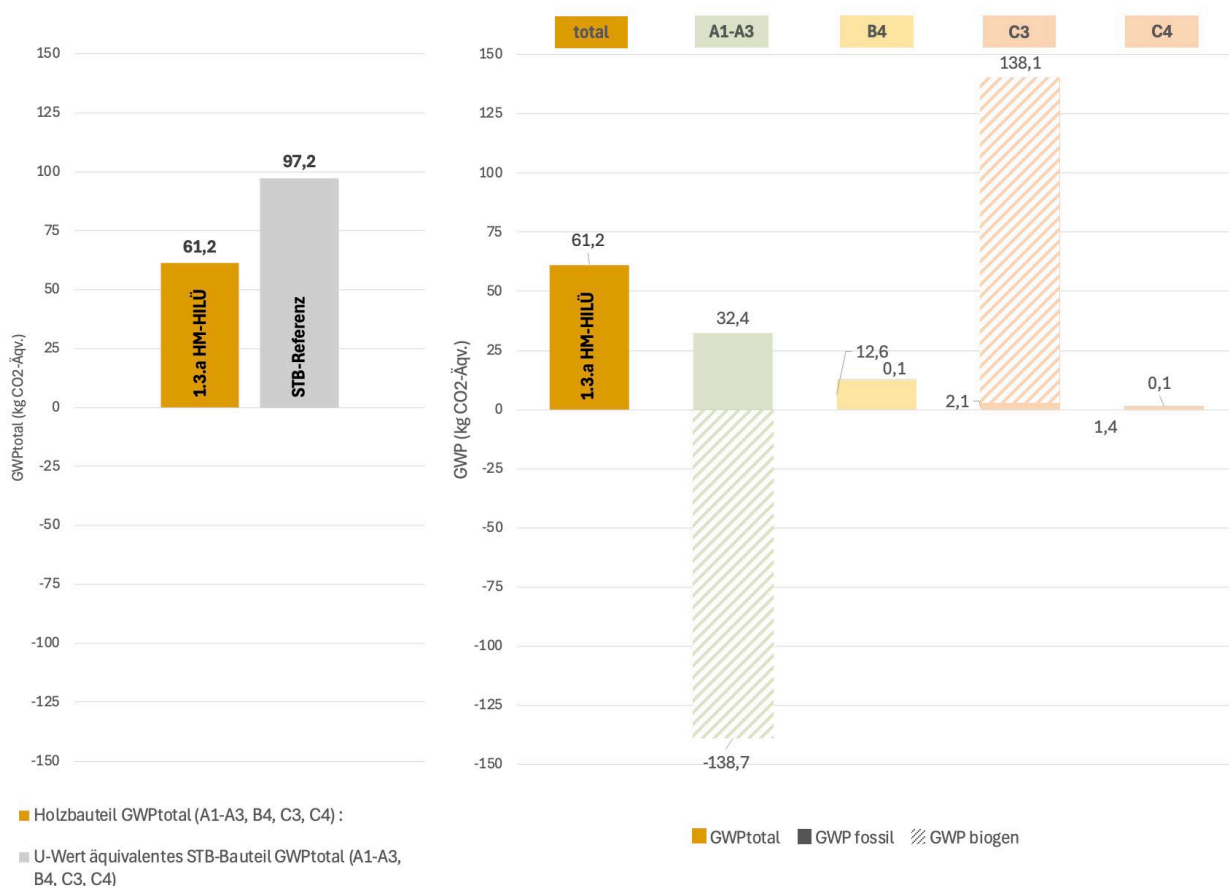


Abbildung 4.4 Gegenüberstellung des GWP_{total} für eine Außenwand in Holzrahmenbauweise und Stahlbetonbauweise (links), Aufgliederung des GWP_{total} der Wand in Holzrahmenbauweise in biogene und fossile Anteile über die betrachteten LCA-Phasen (rechts)

Bilanzierung der Bauteillebensdauer (Modul B4 – Auswechseln / Wartung & Auswirkung auf LCA)

Aus den Lebensdauern der Bauteilschichten lassen sich durch ähnliche Bestandsdauern „Pakete“ für einen Austausch bzw. Sanierung schnüren.

Der Aufbau einer Hinterlüfteten Holzfassade, bestehend aus Schalung, Lattung und Fassadenbahn kommt dabei auf eine Lebensdauer von 32 Jahren. Innenausbauten stellen mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 40 Jahren die zweite Sanierungswelle dar. Diese Dauer kann jedoch sehr stark in Abhängigkeit der jeweiligen Gebäudenutzung schwanken (z. B. kürzere Dauer bei Büronutzung). Tragende Schichten aus Holz wie die Außenwand (76 J.) und die Brettsper Holzdecke (78 J.) verfügen über eine sehr ähnliche Lebenserwartung und stellen damit eine weitere Sanierungswelle dar. Da die angegebenen Werte dem Median darstellen, wird seitens des Forschungsprojekts davon ausgegangen, dass die Tragkonstruktion des Gebäudes, bei ausreichendem konstruktivem Holzschutz, einen vollständigen zweiten Nutzungszyklus durchlaufen könnte und damit eine effektive Nutzungsdauer von 100 Jahren aufweist.

Zusammenfassend lassen sich die Bauteilauswechselungen für den Holzbau in drei Sanierungswellen gliedern:

- Sanierungswelle nach etwa 30/35 Jahren: äußere Fassade und Dachaufbau
- Sanierungswelle nach etwa 40/45 Jahren: Innenausbau (Verkleidung und Fußbodenaufbau)
- Sanierungswelle nach etwa 100 Jahren: Tragende Holzbauteile (Außenwände und Decken)

Eine genaue Aufschlüsselung der Bauteillebensdauern ist im Dokument ([Hintergrunddokument Ökologische Bewertung](#)) zu finden.

4.4.3 Bauteilwiederverwendung und Bilanzierung von Reuse-Bauteilen

Im Rahmen einer Sys.Wood-Masterarbeit wurde die Frage der Bilanzierung von Reuse-Bauteilen untersucht [54]. Die Datengrundlage für die Bauteilwiederverwendung liefert die Kombination aus Bauteillebensdauer und deren Trennbarkeit. Ein Bauteil, welches nicht zerstörungsfrei rückgebaut werden kann, ist demnach entweder gar nicht oder nur durch zusätzliches Material und Energieaufwand wiederverwendbar. Bauteile, die über eine dementsprechend lange Nutzungsdauer verfügen und demontiert werden können, werden in einen angedachten zweiten Nutzungszyklus überführt und wiederverwendet. Der Umgang von Reuse-Szenarien in der LCA-Bilanzierung ist noch nicht normativ geregelt. Im Rahmen des Forschungsprojektes beschäftigt sich eine Diplomarbeit an der TU Wien mit einem möglichen Ansatz hierfür. Dabei werden zwei Ziele verfolgt:

- Es sollen keine fiktiven Annahmen über mögliche künftige Gutschriften (z. B. thermische Verwertung oder Reuse) bereits in der Planung berücksichtigt werden müssen
- Die Bilanzierung soll im Einklang mit den effektiven CO₂-Äqu.-Bilanzen in der Atmosphäre stehen

Die entwickelte Berechnungsmethode nimmt die, in der europäischen Normung als Standard geltende, Cut-off Methode als Ausgangspunkt. Lasten aus der Herstellungsphase werden vollständig dem ersten Nutzungszyklus zugeordnet. Am Ende jedes Nutzungszyklus wird normgemäß das Modul C angesetzt.

Sollte ein Bauteil einer Wiederverwendung zugeführt werden, so müssen die materialinhärenten Eigenschaften im neuen Nutzungszyklus einbezogen werden. Das im Holz gebundene CO₂-Äqu. wird damit auch in einem weiteren Nutzungszyklus berücksichtigt. Des Weiteren wurden Aufwände für Rückbau, Transport und Einbau berechnet. Um eine Aussage bezüglich der effektiven CO₂-Äqu. Ersparnis einer Wiederverwendung treffen zu können, ist es notwendig die ökologischen Einflüsse eines Bauteils bzw. eines Gebäudes über mehrere Zyklen zu betrachten. Einsparungen aus einer Verzögerung des End-of-Life Szenarios oder der Herstellungsphase können so sichtbar gemacht werden.

Die nachstehende Grafik zeigt den Vergleich der LCA-Analyse der Funktionellen Einheit eines Quadratmeter Wand basierend auf dem Aufbau AW 1.3.a HM-HILÜ: *Standard* und *optimiert*. Bei der Variante *optimiert* wurde der Aufbau so angepasst, dass Tragstruktur, Dämmebene und Innenverkleidung in den zweiten Nutzungszyklus übergeführt werden können, während die Außenverkleidung (Lattung, Hinterlüftung, Fassadenbahn) neu ausgeführt wird. In der Variante *Standard* wird für den Vergleich davon ausgegangen, dass das Bauteil vollständig abgerissen und für das zweite Bauwerk neu hergestellt wird. Aus der Gegenüberstellung wird sichtbar, dass sich mittels einer Wiederverwendung etwa 38 % des GWP_{total} über zwei Nutzungszyklen einsparen lässt. Eine genaue Aufschlüsselung der Berechnung ist im [Hintergrunddokument Ökologische Bewertung](#) ersichtlich.

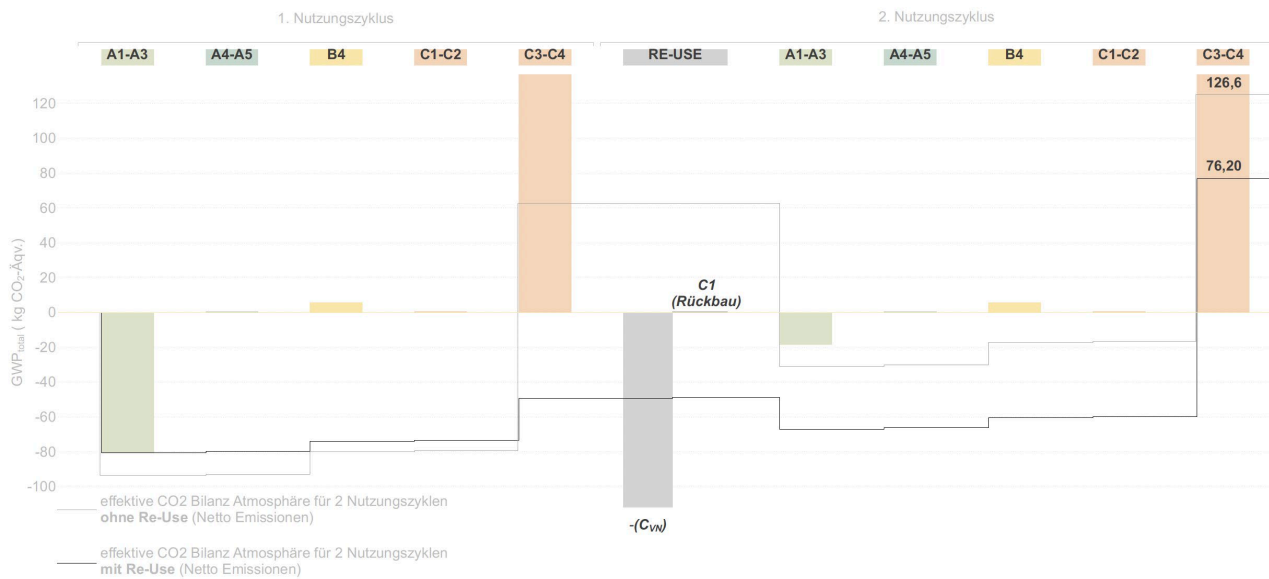


Abbildung 4.5 GWP_{total} für eine Außenwand in Holzrahmenbauweise. Vergleich von zwei Lebenszyklen, einmal mit neu errichteten Bauteilen (orange) und einmal mit Reuse-Anteil (blau) inklusive der effektiven CO₂-Äqu. in der Atmosphäre

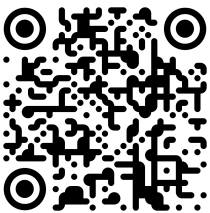
4.5 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Forschungsbedarf besteht in der Abbildung kreislauffähiger Konstruktionen innerhalb des Modulsystems nach EN 15978. Insbesondere die Module B4 (Austausch), C (Rückbau und Entsorgung) sowie D (Potenziale außerhalb der Systemgrenze) erfordern belastbare und konsistente Annahmen. Derzeit fehlt eine methodisch nachvollziehbare Verknüpfung zwischen konstruktiver Detailausbildung und quantitativer LCA-Modellierung.

Ein weiterer zentraler Forschungsbedarf liegt in der methodischen Weiterentwicklung der Lebenszyklusanalyse über die Systemgrenze einzelner Gebäude hinaus. Dies betrifft insbesondere die konsistente Modellierung von Wiederverwendung sowie die zeitliche Bewertung biogener Kohlenstoffspeicherung über mehrere Nutzungszyklen hinweg.

Zudem sind empirisch fundierte Datensätze zur tatsächlichen Wiederverwendung von Holzbauteilen erforderlich. Realisierte Rückbau- und Reuse-Projekte sollten systematisch dokumentiert und hinsichtlich Materialflüssen, Transportaufwand, Qualitätsverlusten und Substitutionseffekten ausgewertet werden, um realitätsnahe Szenarien für Modul D entwickeln zu können.

Im Kontext der geplanten OIB-Richtlinie 7 sowie der europäischen Gebäuderichtlinie 2024/1275 ergibt sich darüber hinaus Forschungsbedarf hinsichtlich der differenzierten Behandlung biogenen Kohlenstoffs. Insbesondere sind Fragen der zeitlichen Bewertung von Kohlenstoffspeicherung, der Mehrfachnutzung von Bauteilen sowie der konsistenten Abbildung über mehrere Lebenszyklen hinweg innerhalb des normativen Rahmens von EN 15804 und EN 15978 weiter zu klären.



Alireza Fadai, Alexander Gerger, Katharina Schachner, Fabian Ulrych, Marius Valente, Markus Wallner-Novak: Sys.Wood: Ökologische Bewertung.
Hintergrunddokumentation.

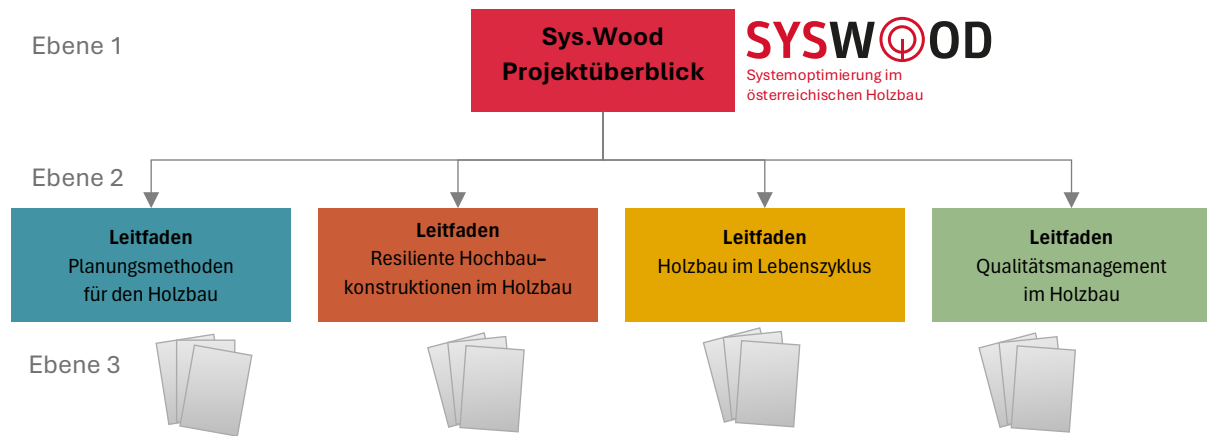
https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_lca

5 Literaturverzeichnis

- [1] Eisenmenger, N., Baumgart, A., Krausmann, F., Haas, W., Neubauer, M., & Gierlinger, S. (2024). Ressourcennutzung 2024 in Österreich. Band 4.
- [2] A. Achatz, E. Margelik, T. Romm, T. Kasper, and D. Jäger, "Kreislaufbauwirtschaft," Wien, 2021.
- [3] W. Klocke, *Mein Haus wird älter was tun? Ratgeber mit Checklisten zur Vermeidung von Bauschäden durch preiswerte Pflege und Unterhaltung*. Wiesbaden/ Berlin: Bauverlag, 1988.
- [4] W. Holz-System-Bau. Pflege und Wartungsanleitung. Handbuch für langfristige Wohnbehaglichkeit und Nutzerzufriedenheit.
- [5] G. Grüll and F. Tscherne, *Wartungsanleitung für Beschichtungen auf Holzoberflächen im Außenbereich*. 2020.
- [6] H. Austria. (2024). Nutzungsanleitung Holzbau Information an die Nutzer.
- [7] C. Koch and G. Grüll, *Terrassen aus Holz*. 2022.
- [8] V. d. E. Hobelindustrie, *Fassade: Planen, Montieren, Pflegen*, 11 ed., 2021.
- [9] S. u. B. Bundesministerium für Wohnen. "Nutzungsdauern von Bauteilen." Nutzungsdauern von Bauteilen - Informationsportal Nachhaltiges Bauen (accessed 19.10., 2025).
- [10] *ÖNORM B 1300:2018 Objektsicherheitsprüfungen für Wohngebäude — Regelmäßige Prüfroutinen im Rahmen von Sichtkontrollen und zerstörungsfreien Begutachtungen Grundlagen und Checklisten*
- [11] *ÖNORM B 3417:2016 Planung und Ausführung von Sicherheitsausstattungen auf Dächern*.
- [12] *ÖNORM B 3419:2018 Planung und Ausführung von Dacheindeckungen und Wandverkleidungen*.
- [13] *ÖNORM B 3521-1: 2012 Planung und Ausführung von Dacheindeckungen und Wandverkleidungen aus Metall - Teil 1: Bauspenglerarbeiten - handwerklich gefertigt*.
- [14] *ÖNORM B 3691: 2019 Planung und Ausführung von Dachabdichtungen*.
- [15] *ÖNORM B 3692: 2014 Planung und Ausführung von Bauwerksabdichtungen*.
- [16] *ÖNORM B 3802-1: 2015 Holzschutz im Bauwesen - Teil 1: Allgemeines*.
- [17] *ÖNORM B 4119: 2018 Planung und Ausführung von Unterdächern und Unterspannungen*.
- [18] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML) (2023): *Österreichische Waldinventur 2016–2021. Ergebnisse und Analysen*. Wien.
- [19] V. Reinberg, T. Tezarek, and F. Strolz, *HolzKreislauf: Lösungsansätze für den zirkulären Holzbau in Österreich*. Wien, 2025.
- [20] C. Sandhaas: *KARLSRUHER TAGE 2024 HOLZBAU Forschung für die Praxis*, Oktober 2024
- [21] Pro:Holz: Zuschnitt 11: Rein ins Holz – Schraube oder Nagel, Nr. 11, September 2003, ISSN 1608-9642
- [22] Peikko DELTABEAM, <https://www.peikko.de/produkte/hybride-konstruktionen/hybride-konstruktionen/> (letzter Zugriff: 20.02.2026)
- [23] Lisa-Mareike Ottenhaus, Zidi Yan, Reinhard Brandner, Paola Leardini, Gerhard Fink, Robert Jockwer: *Design for adaptability, disassembly and reuse – A review of reversible timber connection systems*, Construction and Building Materials, Volume 400, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132823>.
- [24] Graf et al. (2022). *Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen*. DOI:10.13140/RG.2.2.34197.81120.
- [25] M. Wallner-Novak and P. Wörle, *Aussteifungssysteme im Holz-Hochbau*, 1st ed. Wien: Eigenverlag des IHBV, 2021.
- [26] P. Brandstätter, "Entwicklung und statische Analyse eines modularen Betonfertigteilsystems für die Errichtung von Hochhäusern," Masterarbeit, Instiut für Betonbau, Technische Universität Graz, Graz, 2020.

- [27] M. Lorenz, "Vorspannung im mehrgeschoßigen Holzbau," Masterarbeit, Architektur und Bauingenieurwesen, FH JOANNEUM, Graz, 2023.
- [28] H. Adam, "Glueckliche Fügung: Der "Klangkörper Schweiz", " Stadtbauwelt, no. 146, pp. 56–59, 2000. [Online]. Available: https://www.bauwelt.de/dl/727840/Glueckliche_Fuegung.pdf
- [29] K. Ekholm, "Performance of stress-laminated-timber bridge decks," Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2013.
- [30] R. Crocetti, K. Ekholm, and R. Kliger, "Stress-laminated-timber decks: state of the art and design based on Swedish practice," *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 74, no. 3, pp. 453–461, 2016, doi: 10.1007/s00107-015-0966-1.
- [31] K. Below and F. Sarti, "CATHEDRAL HILL 2: CHALLENGES IN THE DESIGN OF A TALL ALL-TIMBER BUILDING," in *World Conference on Timber Engineering*.
- [32] M. Muster, "Vierendeelträger im Holzbau," *timbatec*.
- [33] M. Gräfe, P. Dietsch, and A. Hipper, *Vorspannung von Brettsperrholzkonstruktionen*, 2019.
- [34] Aurand, S. (2024). *A contribution to friction in timber connections* [Dissertation, Karlsruhe]. K10plus.
- [35] M. Wallner-Novak, "Holzbau im Lebenszyklus," in *Abstractband. 18. Forschungsforum der österreichischen Fachhochschulen*, 2025, pp. 488–496.
- [36] M. Wallner-Novak and A. Fadaei, "Advanced Structural Modelling of Cross-Laminated Timber Buildings: Vortragsunterlagen," in *Book of Abstracts: International Conference*, TU Wien, 2025, p. 69ff.
- [37] J. Prünner, "Kreislauffähige Verbindungen im Holzbau: FE-Modellierung vorgespannter BSP-Wände," Masterarbeit. TU Wien: 2025
- [38] J. Schiendorfer, "Vertikale Vorspannung von mehrgeschoßigen Hochbauten aus Holz," Masterarbeit, Institut Architektur und Bauingenieurwesen, FH JOANNEUM, Graz, 2025.
- [39] ÖNORM EN 1995-2:2010-12-01: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken*, Wien: Austrian Standards
- [40] ÖNORM EN 12812:2008-12-01: *Traggerüste – Anforderungen, Bemessung und Entwurf*, Wien: Austrian Standards
- [41] Richtlinie (EU) 2024/1275 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. April 2024 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
- [42] Lemmerer, Alexandra (2023). *Ökologische Bewertung von Holzrahmenwänden: und die Anteile der Vorfertigung im Vergleich* [Bachelorarbeit]. FH JOANNEUM, Graz.
- [43] Herzog, A. (2023). *Prozessanalyse und ökologische Bewertung von Wandelementen im Holzbau* [Bachelorarbeit]. FH JOANNEUM, Graz.
- [44] Achenbach, Hermann; Rüter, Sebastian (2016): *Ökobilanz-Daten für die Erstellung von Fertighäusern in Holzbauweise*. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen Report, 38).
- [45] Hafner, A.; Rüter, S.; Ebert, S.; Schäfer, S.; König, H.; Cristofaro, L. et al.: *Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden. Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren*. Forschungsprojekt 28W-B-3-054-01, Waldklimafonds.
- [46] Eßig, Natalie; Kustermann, Andrea (2022): *Rural Mining. Entwicklung eines Leitfadens zum Rückbau und Recycling von Einfamilienhäusern in Holzfertigbauweise*. Online verfügbar unter https://www.tib.eu/de/suchen?tx_tibsearch_search%5Baction%5D=download&tx_tibsearch_search%5Bcontroller%5D=Download&tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A184204298X.
- [47] Riedel, Philip Gideon: *Kreislauffähigkeitspotential von Holzhausbauten in Theorie und Praxis - ökonomische und ökologische Aspekte des Re-Use-Potentials*. Master Thesis.
- [48] Kromoser et al. (2023): *Orientierungsleitfaden ZiFa 1.0*. Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) im Auftrag der Stadt Wien. Wien

- [49] Dolezal et al. (2024): Katalog kreislauffähiger Holzbauteile. Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie (IBO) und Holzforschung Austria (HFA) im Auftrag des Fachverbands der Holzindustrie Österreichs. Wien
- [50] Koppelhuber et al. (2024): Leitfaden – Rückbauorientiertes Planen und Bauen im Holzbau. Koppelhuber² und Partner im Auftrag der Holzindustrie Österreich.
- [51] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: ÖKOBAUDAT – Informationsportal Nachhaltiges Bauen, <https://www.oekobaudat.de> (letzter Zugriff: 19.02.2026)
- [52] BKI – Konstruktionsaktlas: Bauteile mit Ökobilanzen, CO₂-Äquivalenten und Baupreisen für die nachhaltige und wirtschaftliche Planung, Stuttgart: BKI, 2023.
- [53] baubook GmbH, <https://www.baubook.at/zentrale/> (letzter Zugriff: 19.02.2026)
- [54] F. Ulrych: „Ökologisch optimierte Planungsansätze für flexible Gebäudenutzungsstrategien und zerstörungsfreie Bauteilwiederverwendung“. Masterarbeit. TU Wien: In Bearbeitung



Systemoptimierung im österreichischen Holzbau Sys.Wood Projektüberblick und Ergebnisse

Ernst Alexander Dengg, Alireza Fadaei, Alexander Gerger, Benjamin Kromoser, Nadine Ladstätter, Gottfried Mauerhofer, Marc Pantscharowitsch, Katharina Schachner, Phillip Süß, Marius Valente, Markus Wallner-Novak, Johannes Würzler (in alphabetischer Reihenfolge)

DOI: <https://doi.org/10.60588/2p3j-9655>

ISBN print: 978-3-903318-66-3

ISBN eBook: 978-3-903318-67-0

Sys.Wood: Planungsmethoden für den Holzbau, Leitfaden

Benjamin Kromoser, Marc Pantscharowitsch

DOI: <https://doi.org/10.60588/06k6-0x54>

Sys.Wood: BIM-Übergabe Mock-Ups, Hintergrunddokumentation

Benjamin Kromoser, Marc Pantscharowitsch

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bim-mockups

Sys.Wood: Best Practice Beispiel Bauteilkatalog, Hintergrunddokumentation

Benjamin Kromoser, Marc Pantscharowitsch

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bestpractice-bauteilkatalog

Sys.Wood: Allgemeines Prozesskettenmodell Holzbau

Nadine Ladstätter, Gottfried Mauerhofer, Phillip Süß, Benjamin Kromoser, Marc Pantscharowitsch

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bestpractice-bauteilkatalog

Sys.Wood: Resiliente Hochbaukonstruktionen im Holzbau, Leitfaden

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

DOI: <https://doi.org/10.60588/mbeb-z771>

Sys.Wood: FMEA-Bewertungen, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_ergebnisse_fmea-bewertungen

Sys.Wood: Bauteilaufbauten, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bauteilaufbauten

Sys.Wood: Detailkatalog, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_detailkatalog

Sys.Wood: Checklisten, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_checklisten_anschlussdetails

Sys.Wood: Best-Practice-Beispiele, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_best-practice-beispiele

Sys.Wood: FMEA - Bewertungsmatrix, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_fmea_bewertungsmatrix

Sys.Wood: FMEA - Kriterienkataloge, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_fmea_kriterienkataloge

Sys.Wood: Do-Donts, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_dos&donts_planung

Sys.Wood: Holzbau im Lebenszyklus, Leitfaden

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Katharina Schachner, Marius Valente, Markus Wallner-Novak

DOI: <https://doi.org/10.60588/rw1-r893>

Sys.Wood: Wartungshandbuch Mieter, Hintergrunddokumentation

Katharina Schachner, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_wartung_mieter

Sys.Wood: Wartungshandbuch Verwalter, Hintergrunddokumentation

Katharina Schachner, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_wartung_verwalter

Sys.Wood: Wartungshandbuch Ausführende, Hintergrunddokumentation

Katharina Schachner, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_wartung_ausfuehrende

Sys.Wood: Best Practice Kreislaufwirtschaft, Hintergrunddokumentation

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Fabian Ulrych, Marius Valente

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bestpracticekreislauf

Sys.Wood: Ökologische Bewertung, Hintergrunddokumentation

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Katharina Schachner, Fabian Ulrych, Marius Valente, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_lca

Sys.Wood: Zerlegbare Verbindungen im Holzbau, Hintergrunddokumentation

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Jasmin Prünner, Marius Valente

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_zerlegbare_verbindungen

Sys.Wood: Vertikal Vorgespannte Wandelemente, Hintergrunddokumentation

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Jasmin, Prünner, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_vorspannung

Sys.Wood: Qualitätsmanagement im Holzbau, Leitfaden

Nadine Ladstätter, Phillip Süß, Gottfried Mauerhofer

DOI: <https://doi.org/10.60588/tzwz-1455>

ISBN eBook: 978-3-903318-71-7

Projektpartner: FH JOANNEUM // Holzcluster Steiermark //
Nussmüller.Architekten // RWT Plus ZT GmbH // BOKU Wien //
ENW // WOODPLAN GmbH // weissenseer // TU Graz // Pöll //
Strobl Bau - Holzbau GmbH // O.K. Energiehaus // TU Wien